

DISEÑO, SIMULACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE AEROGENERADOR DE
EJE HORIZONTAL

RONY SNEIDER QUINTERO RAMÍREZ

GABRIEL ERNESTO SIZA

Informe final del trabajo de grado, en la modalidad de investigación

DIRECTOR

Ing. Alfonso Santos

Docente Ing. Mecánica

UPB-BUCARAMANGA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2009

DISEÑO, SIMULACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE AEROGENERADOR DE
EJE HORIZONTAL

RONY SNEIDER QUINTERO RAMÍREZ

GABRIEL ERNESTO SIZA

Trabajo de grado para optar el título de
Ingeniero Mecánico

DIRECTOR

Ing. Alfonso Santos

Docente Ing. Mecánica

UPB-BUCAFAMANGA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2009

NOTA DE ACEPTACIÓN:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga, 10 de Marzo del 2009

DEDICATORIA

Este logro va dirigido a mis padres y hermanos que por medio de sus consejos, su apoyo incondicional y sus esfuerzos han formado un profesional más para el servicio de la sociedad; de forma especial, una dedicatoria a mis abuelos y a mi tía que me acogieron en el seno de su hogar y me brindaron todo su cariño y amor familiar. Por último, a aquellas personas que estuvieron a mi lado durante el desarrollo de mi carrera y sobre todo a aquellas personas que por medio de sus oraciones me entregaron a Dios durante cinco (5) años, para alcanzar el éxito.

Con Cariño

Rony Sneider Quintero Ramírez

DEDICATORIA

Dedico este logro a Dios que me otorgo la oportunidad de realizarlo, ya que permitió que mis seres queridos me brindaran la oportunidad de llegar a ser un ingeniero, con el cual la sociedad pueda sentirse satisfecho con los proyectos que realice; además de la sabiduría que me colmó durante el proceso de estudio.

En particular lo dedico a mi Madre, que con tesón llegó a darme la fortaleza y la oportunidad de realizarme como persona y permitió así llegar a formarme como profesional; a mi tía, que con sus oraciones me ayudó a tener paciencia, disciplina e interés por llegar a ser un Ingeniero Mecánico. Por último, a todas aquellas personas que compartieron conmigo durante los cinco (5) años que duró el transcurso de mi carrera.

Gabriel Ernesto Siza

AGRADECIMIENTO

Agradecemos al ingeniero Alfonso Santos, que gracias a su paciencia, consejos y experiencia, nos colaboró y ayudó durante el transcurso de la ejecución del proyecto; sin su conocimiento no habiéramos podido sortear las dificultades que se presentaron en el desarrollo del proyecto. Al equipo de mantenimiento de la Universidad Pontificia Bolivariana, en especial a Ludwing Casas, sin su colaboración no sería una realidad la elaboración de este proyecto.

RESUMEN

El proyecto busca diseñar, modelar y construir un prototipo de aerogenerador de eje horizontal para la generación de energía eléctrica; el equipo permite variar el ángulo de inclinación y tipo de aspa con el fin de determinar los parámetros aerodinámicos, los cuales determinan la eficiencia del sistema.

En los últimos años la tendencia mundial de los países desarrollados ha estado orientada a la obtención de electricidad a partir de energías renovables y considerando que Colombia no tiene datos suficientes sobre la energía eólica, se hace indispensable comenzar a realizar diferentes estudios, con el fin de promover las energías limpias en el país.

Para la construcción del sistema eólico, se realiza la simulación en ANSYS CFX con el objetivo de observar el comportamiento del viento sobre el perfil, permitiendo así escoger el más adecuado, para la elaboración de las aspas.

El sistema recibe la energía cinética del viento por medio de las aspas, las cuales proporcionan el trabajo mecánico al eje, por lo tanto, permite que el generador origine la electricidad.

La eficiencia del sistema puede medirse, con la potencia suministrada del alternador y la potencia del viento sobre las aspas.

ABSTRACT

The project search to design, model and build a prototype flat axis wind turbine for electricity generation; the apparatus will change the angle tilt and type of blade to determine the aerodynamic parameters, which determine the efficiency of the system.

In recent years the global trend in developed countries has been aimed at obtaining electricity from renewable and considering that Colombia does not have sufficient data on wind energy, it becomes imperative to undertake studies in order to promote clean energy in the country.

For the construction of the wind system, the simulation is performed in ANSYS CFX with the objective of observing the behavior of the wind on the profile, thus allowing to choose the most suitable for the manufacture of the blades.

The system receives the kinetic energy of wind through the blades, which provide mechanical work to the shaft, thus allowing the rise in electricity generator.

System efficiency can be measured with a power output of the alternator and the power of wind on the blades.

INTRODUCCIÓN

Como es bien sabido, uno de los grandes problemas en la actualidad es la contaminación en todos los lugares del planeta por el mal uso de los recursos naturales, por parte de la humanidad. Desde hace mucho tiempo, el hombre ha utilizado la energía del viento para su propio beneficio. Esta energía ha sido aprovechada en diversas aplicaciones, como en molinos de cereales, sacar agua de pozos, mover barcos y, recientemente, para la generación de energía eléctrica. En la actualidad, se puede obtener energía de diferentes formas de una manera no renovable, en la que se puede encontrar el uso de origen mineral, atómico, termal o hidroeléctrico. El ser humano ha encontrado otro tipo de fuente de energía que puede aprovechar de una manera más civilizada, para su beneficio, sin dañar el medio ambiente. En estas energías renovables se encuentran la energía eólica, la energía solar, la geotérmica, entre otras. La energía eólica, como todas las demás fuentes de energía, tiene ventajas y desventajas, pero entre aquéllas, se dice que es mayor el beneficio que ofrece que las desventajas que puede acarrear. Para aprovechar la energía eólica se necesita conocer los diferentes tipos de aerogeneradores que existen en la actualidad e identificar las partes que compone un aerogenerador; a lo largo de este proyecto se explicará el proceso de fabricación de un aerogenerador, comenzando por el diseño, luego por una etapa de simulación, que permitirá entender el comportamiento de el prototipo, y finalmente, la construcción del aerogenerador con materiales de bajo costo, aquí se tiene como expectativa obtener los mejores resultados que permitan crear una idea de la importancia de este tipo de energías en el medio, para la conservación de la naturaleza.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION.....	9
1. OBJETIVOS.....	18
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	18
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	18
2. MARCO TEORICO.....	19
2.1 HISTORIA DEL AEROGENERADOR.....	19
2.2 AEROGENERADOR.....	23
2.3 TIPO DE AEROGENERADORES.....	24
2.3.1 TIPO DE EJE.....	24
2.3.1.1 EJE VERTICAL.....	25
2.3.1.2 EJE HORIZONTAL.....	25
2.4 ORIENTACION CON RESPECTO AL VIENTO.....	26
2.4.1 A BARLOVENTO.....	26
2.4.2 A SOTAVENTO.....	26
2.5 EL NUMERO DE PALAS.....	26
2.5.1 DE UNA PALA.....	27
2.5.2 CON DOS PALAS.....	27
2.5.3 DE TRES PALAS.....	27
2.5.4 MULTIPALA.....	28

2.5.5 MEDIANTE CONICIDAD.....	28
2.5.6 MEDIANTE UNA VELETA.....	28
2.5.7 MEDIANTE MOLINOS AUXILIARES.....	28
2.6 CONTROL DE POTENCIA.....	28
2.6.1 DISEÑO DE LAS PALAS.....	29
2.6.3 REGULACION ACTIVA POR PERDIDA AERODINAMICA.....	29
2.7 PARTES DE UN AEROGENERADOR.....	29
2.7.1 LA GONDOLA.....	30
2.7.2 LAS PALAS DEL ROTOR.....	31
2.7.3 EL BUJE.....	31
2.7.4 EJE DE BAJA VELOCIDAD.....	31
2.7.5 MULTIPLICADOR.....	31
2.7.6 GENERADOR ELECTRICO.....	31
2.7.7 CONTROLADOR ELECTRONICO.....	32
2.7.8 LA UNIDAD DE REFRIGERACION.....	32
2.7.9 LA TORRE.....	32
2.7.10 EL ANEMOMETRO Y LA VELETA.....	32
2.8. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UN AEROGENERADOR.....	32
2.9. TIPOS DE TORRE DE UN AEROGENERADOR.....	34
2.9.1 TORRES TUBULARES DE ACERO.....	34
2.9.2 TORRES DE CELOSIA.....	35
2.9.3 TORRES DE MASTIL TENSADO POR CABLES.....	35
2.9.4 SOLUCIONES DE TORRES HIBRIDAS.....	35
2.9.5 CONSIDERACIONES AERODINAMICAS.....	37

2.9.6 CONSIDERACIONES DE DINAMICA ESTRUCTURAL.....	37
2.9.7 ELECCIONES ENTRE TORRES ALTAS Y BAJAS.....	37
2.10 PARAMETROS AERODINAMICOS.....	38
2.10.1 RESISTENCIA, SUSTENTACION, PERFIL ALAR.....	38
2.11 ANSYS CFX.....	45
2.11.1 CARACTERISTICAS PRINCIPALES.....	46
3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN.....	47
3.1 DISEÑO DE LA TORRE.....	47
3.2 PERFIL ALAR.....	53
3.2.1 CLASIFICACION DE LOS PERFILES.....	53
3.2.2 TERMINOLOGIA ALAR.....	54
3.2.3 PARAMETROS DE DISEÑO.....	56
3.2.4 RELACIÓN DE VELOCIDAD PERIFÉRICA TSR.....	56
3.2.5 RENDIMIENTO AERODINAMICO (η).....	56
3.2.6 ÁREA FRONTAL BARRIDA POR LA PALA.....	58
3.3 DISEÑO DEL ROTOR.....	82
4. DATOS TEÓRICOS DEL FUNCIONAMIENTO DEL AEROGENERADOR.....	86
5. DATOS OBTENIDOS DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES REALIZADAS	
A LOS DIFERENTES PERFILES.....	93
CONCLUSIONES.....	107
RECOMENDACIONES.....	108
BIBLIOGRAFIA.....	109

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA 1. AEROGENERADORES.....	24
FIGURA 2. PARTES DE LA GONDOLA.....	30
FIGURA 3. TORRE TUBULAR DE ACERO.....	34
FIGURA 4. TORRE DE CELOSIA.....	35
FIGURA 5. TORRE DE MASTIL TENSADO POR CABLES.....	36
FIGURA 6. TORRE HIBRIDA.....	36
FIGURA 7. TORRES ALTAS Y BAJAS.....	38
FIGURA 8. PERFIL ALAR.....	39
FIGURA 9. SUSTENTACION VS ANGULO DE ATAQUE.....	42
FIGURA 10. ARRASTRE VS ANGULO DE ATAQUE.....	43
FIGURA 11. ANGULO DE ATAQUE MENOR QUE EL ANGULO DE PÉRDIDA.....	43
FIGURA 12. ANGULO DE ATAQUE MAYOR QUE EL ANGULO DE PÉRDIDA.....	44
FIGURA 13. CONSTRUCCIÓN DE LA TORRE.....	48
FIGURA 14. TORRE DE ACERO MODELADA EN ANSYS.....	49
FIGURA 15. TORRE DE ALUMINIO MODELADA EN ANSYS.....	50
FIGURA 16. DEFORMACIÓN TOTAL DE LA TORRE POR LAS FUERZAS DEL ASPA.....	51
FIGURA 17. PLANO DE LA TORRE.....	52
FIGURA 18. TERMINOLOGIA ALAR.....	54

FIGURA 19. RELACIÓN ENTRE H, EL TSR Y EL NÚMERO DE PALAS PARA D/L CUANDO TIENDE A INFINITO.....	57
FIGURA 20. CURVAS PERFIL NACA 2309.....	60
FIGURA 21. CURVAS PERFIL NACA 4412.....	60
FIGURA 22. CURVAS PERFIL NACA 6321.....	61
FIGURA 23. FUERZA VS INCLINACIÓN NACA 4412.....	64
FIGURA 24. FUERZA VS INCLINACIÓN NACA 2309.....	64
FIGURA 25. FUERZA VS INCLINACIÓN NACA6321.....	65
FIGURA 26. POTENCIA VS INCLINACIÓN NACA 4412.....	66
FIGURA 27. POTENCIA VS INCLINACIÓN NACA 2309.....	66
FIGURA 28. POTENCIA VS INCLINACIÓN NACA 6321.....	67
FIGURA 29. DIVISIÓN DEL PERFIL ALAR.....	68
FIGURA 30. VALORES Φ EN FUNCIÓN DEL SR.....	69
FIGURA 31. VALORES DEL SP VS SR.....	69
FIGURA 32. COEFICIENTES DE ARRASTRE Y DE SUSTENTACIÓN EN FUNCIÓN DE α	70
FIGURA 33 PERFIL NACA 2309 SOLID EDGE.....	75
FIGURA 34. PLANO PERFIL NACA 2309 SOLID EDGE.....	75
FIGURA 35. PERFIL NACA 6321 SOLID EDGE.....	76
FIGURA 36. PLANO PERFIL NACA 6321 SOLID EDGE.....	76
FIGURA 37. PERFIL NACA 4412 SOLID EDGE.....	77
FIGURA 38. PLANO PERFIL NACA 4412 SOLID EDGE.....	77
FIGURA 39. ARMAZÓN PERFIL DE ALA.....	78
FIGURA 40 PERFIL DE ALA.....	79

FIGURA 41. PERFIL DE ALA RECUBIERTO CON POLIURETANO.....	80
FIGURA 42. MOLDE ABIERTO EN YESO DEL PERFIL DE ALA.....	81
FIGURA 43. MOLDE CERRADO EN YESO DEL PERFIL DE ALA.....	82
FIGURA 44. PLANO DE LA ESTRELLA.....	83
FIGURA 45. PLANO DEL EJE.....	85
FIGURA 46. SIMULACIÓN PERFIL NACA 2309 EN ANSYS CFX.....	86
FIGURA 47. SIMULACIÓN PERFIL NACA 4412 EN ANSYS CFX.....	87
FIGURA 48. SIMULACIÓN PERFIL NACA 4412 EN ANSYS CFX.....	88
FIGURA 49. INCLINACIÓN VS FUERZA A VELOCIDAD DE 5 m/s.....	89
FIGURA 50. INCLINACIÓN VS FUERZA A VELOCIDAD 10 m/s.....	90
FIGURA 51. RPM VS INCLINACIÓN.....	101
FIGURA 52. POTENCIA VS INCLINACIÓN.....	102
FIGURA 53 EFICIENCIA VS ANGULO DE ATAQUE.....	109
FIGURA 54 EFICIENCIA VS INCLINACIÓN.....	104
FIGURA 55 EFICIENCIA VS ANGULO DE ATAQUE A V=5 M/S.....	105
FIGURA 56 EFICIENCIA VS ANGULO DE ATAQUE A V=10M/S.....	106

LISTA DE TABLAS

	Pág.
TABLA 1. MAQUINAS DE VIENTO DE EJE HORIZONTAL.....	62
TABLA 2. DATOS TÉCNICOS DEL POLIURETANO.....	74
TABLA 3. FUERZAS EN EL PERFIL NACA 6321.....	91
TABLA 4. FUERZAS EN EL PERFIL NACA 2309.....	91
TABLA 5. FUERZAS EN EL PERFIL NACA 4412.....	92
TABLA 6. DATOS OBTENIDOS PERFIL NACA 4412 INCLINACIÓN -40 GRADOS..	93
TABLA 7. DATOS OBTENIDOS PERFIL NACA 4412 INCLINACIÓN -30 GRADOS..	94
TABLA 8. DATOS OBTENIDOS PERFIL NACA 4412 INCLINACIÓN -20 GRADOS..	94
TABLA 9. DATOS OBTENIDOS PERFIL NACA 4412 INCLINACIÓN -10 GRADOS..	94
TABLA 10. DATOS OBTENIDOS PERFIL NACA 4412 INCLINACIÓN 0 GRADOS...	95
TABLA 11. DATOS OBTENIDOS PERFIL NACA 4412 INCLINACIÓN 10 GRADOS..	95
TABLA 12. DATOS OBTENIDOS PERFIL NACA 4412 INCLINACIÓN 20 GRADOS..	95
TABLA 13. DATOS OBTENIDOS PERFIL NACA 4412 INCLINACIÓN 30 GRADOS..	96
TABLA 14. DATOS OBTENIDOS PERFIL NACA 2309 INCLINACIÓN -30 GRADOS..	96
TABLA 15. DATOS OBTENIDOS PERFIL NACA 2309 INCLINACIÓN -20 GRADOS..	96
TABLA 16. DATOS OBTENIDOS PERFIL NACA 2309 INCLINACIÓN -10 GRADOS..	97

TABLA 17.DATOS OBTENIDOS PERFIL NACA 2309 INCLINACIÓN 0 GRADOS....	97
TABLA 18. DATOS OBTENIDOS PERFIL NACA 2309 INCLINACIÓN 10 GRADOS..	97
TABLA 19. DATOS OBTENIDOS PERFIL NACA 2309 INCLINACIÓN 20 GRADOS..	98
TABLA 20. DATOS OBTENIDOS PERFIL NACA 2309 INCLINACIÓN 30 GRADOS..	98
TABLA 21. DATOS OBTENIDOS PERFIL NACA 6321INCLINACIÓN 0 GRADOS....	98
TABLA 22.DATOS OBTENIDOS PERFIL NACA 6321 INCLINACIÓN 10 GRADOS...	99
TABLA 23. DATOS OBTENIDOS PERFIL NACA 6321 INCLINACIÓN 10 GRADOS..	99
TABLA 24.DATOS OBTENIDOS PERFIL NACA 6321 INCLINACIÓN -10 GRADOS..	99
TABLA 25.DATOS OBTENIDOS PERFIL NACA 6321 INCLINACIÓN -20	
GRADOS.....	100
TABLA 26 DATOS OBTENIDOS PERFIL NACA 6321 INCLINACIÓN -30	
GRADOS.....	100

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar, simular y construir un prototipo de aerogenerador horizontal, tomando como base los resultados de las simulaciones en el software CFX y permitiendo su utilización en un laboratorio da la facultad para realizar pruebas de eficiencia del sistema.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- 1) Realizar simulaciones en CFX de las aspas de 50 cm de longitud de un aerogenerador para determinar su comportamiento aerodinámico, basado en velocidades de viento entre 2 y 10 m/s.
- 2) Realizar el diseño detallado de un modelo de aerogenerador sin tener en cuenta el control de posición del viento y su respectivo almacenamiento de energía eléctrica.
- 3) Realizar la construcción de la estructura y el aerogenerador.
- 4) Determinar los parámetros aerodinámicos que influyen en la eficiencia del aerogenerador.
- 5) Obtener datos prácticos del prototipo de aerogenerador en un ambiente real, para determinar la eficiencia que tiene el modelo.

2. MARCO TEORICO

2.1 Historia del aerogenerador

A través de la historia, se ha considerado que el viento es útil; los egipcios fueron los primeros en utilizar este tipo de energía. Ellos construyeron un molino, para darle aire a una clase órgano musical. Por otra parte, se considera que la primera maquina eólica fue construida por Herón de Alejandría, en el siglo II a.C.

A partir de los siglos XII – XIII empieza a propagarse el uso de molinos de viento, para la elevación de agua y la trituración del grano. Las más antiguas máquinas eólicas aparecieron en Turquía, Irán y Afganistán, a principios del siglo XII. En Europa, se propagaron los molinos de viento, primordialmente en Bélgica y los Países Bajos. Las características de los molinos cambiaban de país en país, por ejemplo, en Holanda, tenían molinos de 4 aspas, mientras que Portugal tenía 6, y Grecia, 12 aspas. Los molinos con mayor número de palas dan mejor rendimiento a menores velocidades del viento.

Cuando llega la revolución industrial, se interrumpe el desarrollo de los molinos de viento, a causa del uso de energía suministrada por el vapor, la electricidad y los combustibles fósiles. A mitad del siglo XIX, aparece el popular modelo multipala

americano, que fue utilizado para el bombeo de agua a través de todo el mundo y cuyos estudios fueron la base para el diseño de los modernos generadores eólicos.

Las guerras mundiales propiciaron el desarrollo de los aerogeneradores eólicos, esto se debe a que hubo progresos técnicos en las hélices de aviones, y en consecuencia, los proyectos de aerogeneradores de dos y tres palas. Se construyó únicamente las máquinas eólicas de dos palas, ya que eran más económicas, inclusive, se consideró construir con una sola aspa y un contra peso. Actualmente predominan los molinos tripalas. Estos aerogeneradores giran más rápidamente que los multipalas, lo que constituye una ventaja cuando se trata de alimentar máquinas de gran velocidad de rotación, como los alternadores eléctricos.

Los aerogeneradores de eje vertical tienen la ventaja de adaptarse a cualquier dirección del viento. Por ello se los llama panémonos (todos los vientos). No utilizan dispositivos de orientación. El ingeniero Francés Darrieus fue el inventor de este tipo de aerogenerador, en el año de 1925. Actualmente, las máquinas pequeñas, de 1 a 60 Kw, pueden ser construidas a un precio inferior que el de los molinos de viento clásicos de eje horizontal. En EEUU, los laboratorios Sandia, en Albuquerque Nuevo México, estudian y comercializan los molinos de viento Darrieus.

El primer aerogenerador fue construido en Francia, en 1929, pero se rompió a causa de una tormenta violenta. La compañía electromecánica construyó e instaló, en *Bourget*, un aerogenerador de dos palas, de 20 metros de diámetro.

En 1941, la NASA construyó un bipala de 53 m de diámetro, previsto para una potencia máxima de 1.250 Kw, que se instaló en Vermont, en el nordeste de EEUU.

Las primeras pruebas, iniciadas en octubre de 1941, continuaron durante unos 15 meses. En 1943, un pequeño incidente bloqueó la máquina durante dos años, ya que las dificultades ligadas a la guerra retrasaron la fabricación de piezas nuevas. Vuelto a poner en marcha, el aerogenerador proporcionó corriente al sector durante veintitrés días, luego se rompió una de las palas y se abandonó el proyecto.

En 1975, se puso en servicio los aerogeneradores Mod. 0 (Modelo), con palas de metal de un diámetro de 38 metros, que producían 100 Kw. En 1977, se construyó el Mod. 0 A que tenía 200 Kw. La GENERAL ELECTRIC termina el bipala Mod. 1 en 1978, que con un diámetro de 60 metros acciona un alternador de 2 Mw. Mientras la BOEING estudia el Mod. 2, ideal para los vientos medios de las grandes llanuras, que con 91 metros de diámetro produce 2,5 Mw, con palas de acero. [3]

La ELECTRICITÉ de Francia realizó un estudio en las diferentes regiones y construyó varios aerogeneradores experimentales. El aerogenerador “Best, Romaní” tripala de 30 m de diámetro fue instalado en Nogent-le-Roy en Beauce. Podía proporcionar 800 Kw, con un viento de 60 Km/h. Este prototipo aportó, entre 1958 y 1962, información sobre el funcionamiento en condiciones reales. La empresa Neyrpic instaló en Saint-Rémy-des-Landes dos aerogeneradores de tres palas. Uno de 21 metros de diámetro que producía 130 Kw; el otro, de 35 m y previsto para producir 1.000 Kw.

Durante los años 1955 y 1957 se construye en Alemania un aerogenerador de dos palas con un diámetro de 34 m, al este de Stuttgart. Esta máquina funcionó hasta 1968.

Dinamarca construye en 1957 el Gedser Mil, con tres hélices de 24 m de diámetro que funcionó hasta 1968. Este producía 200 Kw con una velocidad del viento de hasta 15 m/s.

El petróleo fue el causante de que se suspendieran los grandes proyectos de aerogeneradores en el mundo, debido a que era más económico generar energía eléctrica por medio de este combustible. En la década de los 70's, se inicia una nueva etapa en el aprovechamiento de la energía cinética originada por el viento. Además, con las nuevas tecnologías, y el desarrollo del campo de aviación, se da por hecho la aparición de una nueva generación de máquinas eólicas con mayor eficiencia que las anteriores y al mismo tiempo se permite su explotación bajo criterios de rentabilidad económica, en zonas de potencial eólico elevado.

En la misma década, los estadounidenses se enfrentaron a un déficit de suministro de energía eléctrica; ellos empezaron un programa para explotar la energía eólica. En aquel momento, se estimaba que esta energía renovable podría, aparte de sus aplicaciones tradicionales, proporcionar Kw /h a las redes eléctricas a un precio igual o inferior que el de las centrales térmicas. Esto se haría realidad con la puesta en servicio de grandes aerogeneradores que proporcionaban potencias eléctricas comprendidas entre 2 y 5 Mw. EEUU cuenta con numerosos proyectos para la utilización de la energía del viento, incluso, en combinación con otras centrales, como las hidroeléctricas.

Los primeros aerogeneradores de grandes magnitudes se construyeron en los Estados Unidos, allí, en 1941, había un aerogenerador y su hélice pesaba 7 toneladas y tenía un diámetro de 53 metros. Desde 1973, y bajo la responsabilidad de la NASA,

los Estados Unidos han reanudado la construcción de máquinas eólicas gigantescas. Las dos más grandes miden 61 y 91 metros de diámetro y funcionan desde 1978 en Boone (Ohio) y en Barstow (California). Producen alrededor de 2.000 a 2.500 Kw. de electricidad. Las turbinas eólicas prometen grandes ahorros; la compañía PG&E se encuentra en un proyecto de cinco años de duración, en cooperación con el Instituto de Investigación de Energía Eléctrica (IIEE) de Palo Alto, y U. S. Windpower, de Livermore, ambos en California, para desarrollar, construir y probar prototipos de una turbina eólica de 300 Kw y de velocidad variable. [3]

2.2 Aerogenerador

Los aerogeneradores (ver figura 1) son generadores eléctricos movidos por la acción del viento. Los actuales aerogeneradores descienden directamente de los molinos de viento utilizados para la trituration y obtención de harina. La energía eólica, en este caso, la energía cinética del viento en movimiento, suministra energía mecánica a un rotor hélice que por medio de una transmisión mecánica hace girar el rotor de un aerogenerador que normalmente es un alternador trifásico, éste convierte la energía rotacional en energía eléctrica.

En la actualidad existen diferentes tipos de aerogeneradores, estos pueden clasificarse dependiendo de su potencia, la posición de su eje, el tipo de generador etc. Los aerogeneradores pueden trabajar de manera individual o pueden trabajar agrupados en parques eólicos o plantas de generación de energía eólica, que deben estar a una distancia prudente, para evitar un impacto ambiental por la turbulencias generadas por el movimiento de las palas.

Figura 1 Aerogeneradores



Fuente <http://angelongo.en.eresmas.com/historiaenergiaeolica.htm>

En Europa, normalmente, los aerogeneradores se agrupan a las afueras de las ciudades alemanas, danesas, holandesas y españolas, y forman así grandes núcleos preferiblemente en las zonas montañosas, normalmente alejadas de las poblaciones. En la actualidad la energía eólica es más popular, y demuestra la viabilidad industrial y la búsqueda de nuevas fuentes de energías no contaminantes. [1]

2.3 TIPOS DE AEROGENERADORES

Los aerogeneradores se pueden clasificar de acuerdo a su tipo de eje, a la orientación con respecto al viento, el número de palas, control de potencia y por la regulación activa por pérdida de potencia aerodinámica.

2.3.1 Tipo De Eje

Se pueden clasificar por eje vertical y eje horizontal.

2.3.1.1 Eje vertical

Son conocidos como VAWT, que proviene de las siglas en ingles (*vertical axis wind turbines*), se caracterizan porque su eje está en posición perpendicular al suelo y a la dirección del viento. La mayor ventaja que puede brindar este aerogenerador es la de eliminar los complejos mecanismos de direccionamiento y las fuerzas a la que son sometidas las palas por los cambios de orientación del rotor, además, no es necesario desconectarse a altas velocidades del viento. Su desventaja es que tiene una baja capacidad de generar energía.

Los aerogeneradores de eje vertical pueden clasificarse en:

- Darrieus: Consiste en dos o tres arcos que giran alrededor del eje.
- Sabonius: Dos o más filas de semicírculos, colocados opuestamente alrededor del eje.
- Panémonas: Cuatro o más semicírculos unidos al eje central. [1]

2.3.1.2 Eje horizontal

Se conocen como HAWT, que proviene de las siglas en ingles (*horizontal axis wind turbines*), son los generadores más comunes y en ellos se han concentrado el diseño y la investigación, en los últimos años. Estos aerogeneradores se caracterizan porque su eje rotacional se encuentra paralelo al suelo y a la dirección del viento. Su mayor ventaja, cuando estos aerogeneradores se encuentran a una altura entre 40 y 60 metros del suelo, es la de aprovechar mejor la velocidad del viento, además, los

mecanismos que se utilizan para convertir la energía del viento en otro tipo de energía se encuentran ubicados entre la torre y la góndola; también se caracterizan por tener una eficacia muy alta. Su desventaja es su transporte, a causa de su gran dimensión (torres de 60 m y palas de 40 m), además, las palas deben resistir altas velocidades de más de 100 Km/h donde deben ser detenidas, para evitar daños en su estructura.

2.4 La orientación con respecto al viento

Los aerogeneradores son clasificados por su orientación con relación del viento en:

2.4.1 A barlovento

La mayoría de los aerogeneradores utilizan este tipo de diseño, que consiste en colocar el rotor de cara al viento, evitando el abrigo de éste tras la torre. Como desventaja se tiene que la necesidad de un mecanismo de orientación del rotor y, además, éste debe estar situado a cierta distancia de la torre.

2.4.2 A sotavento

Su mayor ventaja es que el rotor puede ser más flexible y éste no necesita de mecanismo de orientación. Su mayor desventaja es la variación de la potencia eólica, debido al paso del rotor por el abrigo de la torre, creando cargas de fatiga considerables en la turbina.

2.5 El número de palas

Los aerogeneradores pueden ser:

- De una pala.
- Con dos palas.
- De tres palas.
- Multipalas.
- Mediante conicidad.
- Mediante una veleta.
- Mediante molinos auxiliares.

2.5.1 De una pala

Este tipo de aerogenerador, por tener una sola pala, necesita de un contrapeso en su extremo; por ello, su velocidad de giro es muy elevada lo que introduce en el eje esfuerzos variables; esto acorta la vida de funcionamiento del aerogenerador.

2.5.2 Con dos palas

Son aerogeneradores de bajo costo, muy livianos; su inconveniente: necesitan una velocidad de giro más alta, para producir la misma cantidad de energía que un aerogenerador común.

2.5.3 De tres palas

Son los aerogeneradores más utilizados en la actualidad y funcionan con el rotor a barlovento. Este tipo de aerogenerador utiliza motores eléctricos para sus mecanismos de orientación. Los aerogeneradores de tres palas son un 4% más eficientes que con dos palas, y los aerogeneradores de dos palas son 10% más eficientes que con una pala.

2.5.4 Multipala

Se le conoce como el modelo americano, porque contiene multitud de palas y es utilizado para la extracción de agua en pozos

2.5.5 Mediante conicidad

Estos tipos de aerogeneradores usan un motor eléctrico y una serie de engranajes que permiten el giro de todo el sistema, que deja así al aerogenerador en dirección al viento.

2.5.6 Mediante una veleta

Las veletas son utilizadas en aerogeneradores muy pequeños, siendo el método más sencillo para orientar los aerogeneradores.

2.5.7 Mediante molinos auxiliares

Este aerogenerador es poco utilizado. Consiste en instalar a ambos lados de la góndola dos rotores, que son movidos por la fuerza del viento.

2.6 Control de potencia

Algunos aerogeneradores pueden hacer que las aspas varíen su ángulo de incidencia con respecto al viento, para de esta forma controlar la potencia del viento cuando es excesiva y así disminuir la resistencia de las palas al viento y evitar daños estructurales en el sistema.

2.6.1 Diseño de las palas

Es conocido también como diseño de regulación por pérdidas aerodinámicas. La característica de este diseño: la pala esta ligeramente curvada a lo largo de su eje longitudinal, de esta forma el aspa perderá sustentación de forma lenta y progresiva, en vez de hacerlo bruscamente, cuando la velocidad del viento alcanza valores críticos.

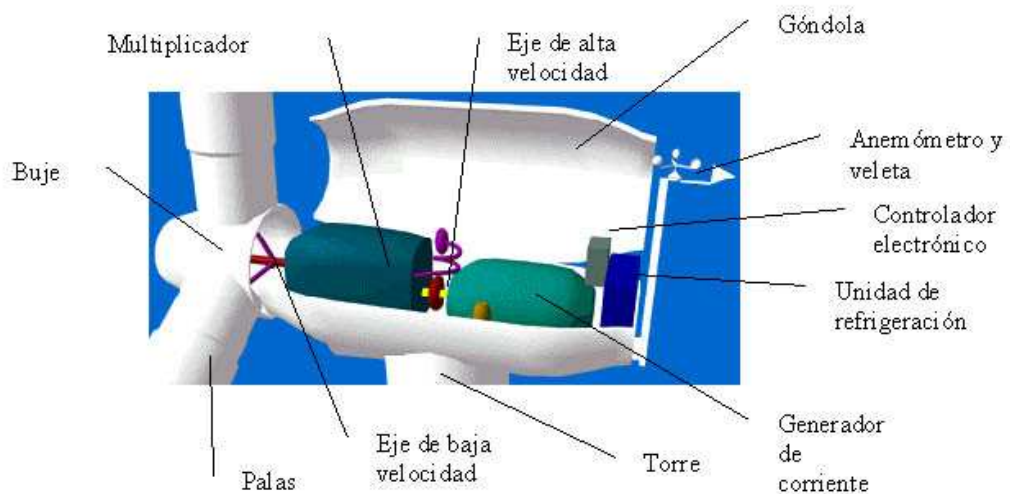
2.6.2 Regulación activa por perdida aerodinámica

El ángulo de paso de las palas es aumentado para llevarlas hasta una posición donde su pérdida de sustentación sea mayor y así poder consumir el exceso de energía del viento. La mayor ventaja: la obtención de potencia puede ser controlada de forma más exacta que con la regulación pasiva, y que puede funcionar a la potencia nominal con casi todas las velocidades de viento.

2.7 PARTES DE UN AEROGENERADOR

En la figura 2 se observa las partes de un aerogenerador.

Figura 2 Partes de la góndola



Fuente <http://angelongo.en.eresmas.com/historiaenergiaeolica.htm>

2.7.1 La góndola

Es en donde están las partes claves del aerogenerador, incluyendo el multiplicador y el generador eléctrico. El personal de servicio puede entrar en la góndola desde la torre de la turbina.

2.7.2 La palas del rotor

Las palas del rotor se encargan de capturar la energía del viento, para transmitir su potencia hacia el buje. Para aerogeneradores modernos de 1500 kw cada pala mide alrededor de 40 metros de longitud y su diseño es similar a las alas de un avión.

2.7.3 El buje

El buje del rotor está acoplado al eje de baja velocidad del aerogenerador.

2.7.4 Eje de baja velocidad

Con el eje de baja velocidad se conecta el buje del rotor al multiplicador. En un aerogenerador de 1500 kw el rotor gira entre 20 y 25 rpm.

2.7.5 Multiplicador

El multiplicador permite que el eje de alta velocidad gire 50 veces más rápido que el eje de baja velocidad. El eje de alta velocidad gira aproximadamente a 1.500 rpm, lo que permite el funcionamiento del generador eléctrico. Estos aerogeneradores están equipados con un freno de disco mecánico de emergencia.

2.7.6 Generador eléctrico

Suele ser un generador asíncrono o de inducción. En los aerogeneradores modernos la potencia máxima suele estar entre 500 y 2.000 Kw.

2.7.7 Controlador electrónico

Es un computador que permanentemente monitoriza las condiciones del aerogenerador y, además, controla el mecanismo de orientación. Cuando el aerogenerador sufre alguna contrariedad, automáticamente el computador detiene el funcionamiento del sistema para evitar mayores problemas.

2.7.8 La unidad de refrigeración

Para mantener el aerogenerador a temperaturas prudentes, se refrigera con un ventilador eléctrico y con una unidad de refrigerante por aceite, utilizada para enfriar el aceite del multiplicador.

2.7.9 La torre

La torre es la encargada de resistir la góndola y el rotor. Generalmente es tubular y de celosía. Las torres tubulares son más seguras para el personal de mantenimiento de los aerogeneradores; por otra parte, las torres de celosía son más económicas que las torres tubulares.

2.7.10 El Anemómetro Y La Veleta

Las señales electrónicas del anemómetro son utilizadas por el controlador electrónico del aerogenerador para conectarlo cuando el viento alcanza aproximadamente 5 m/s.

2.8 Principio de funcionamiento de un aerogenerador

Los aerogeneradores son mecanismos que transforman la energía cinética del viento en energía mecánica. La obtención de esta energía se hace por medio de la interacción del viento sobre las aspas. El principio aerodinámico, por el cual el conjunto de palas gira, es debido a que el aire es forzado a fluir por las caras superior e inferior de un perfil inclinado, que genera en el aspa una diferencia de presiones entre las caras y arroja una fuerza resultante que actúa sobre el perfil.

Si se descompone esta fuerza en dos direcciones obtendremos:

- Fuerza de sustentación o simplemente sustentación de dirección perpendicular al viento
- Fuerza de arrastre de dirección paralela al viento.

La fuerza que domine en el aerogenerador podrá ser de arrastre y de sustentación, esto será según como estén montadas las palas con dirección al viento y al eje de rotación. Excluyendo los molinos de eje vertical, en los aerogeneradores de hoy, la fuerza dominante es la sustentación, ya que permite conseguir, con menor peso y coste, mayores potencias por unidad de área de rotor. Para poner en marcha un aerogenerador, se necesita un valor mínimo para romper los rozamientos y comenzar a producir trabajo útil; este valor mínimo de rozamiento se denomina velocidad de conexión que está comprendida entre 3 y 5 m/s.

Cuando se alcance esta velocidad de conexión, el sistema comenzará a rotar y convertirá la energía cinética en mecánica, hasta que alcance la máxima potencia que el aerogenerador pueda entregar. En este punto, los mecanismos de regulación

comienzan a actuar para evitar que el sistema trabaje a condiciones para las que no fue creado. Aunque el aerogenerador siga trabajando a velocidades mayores, la potencia que entrega no será diferente a la nominal; y esto hasta que alcance la velocidad de corte, esta velocidad se considera a partir de 25 m/s por razones de seguridad. [1]

2.9 Tipos de torres de un aerogenerador

La torre del aerogenerador soporta la góndola y el rotor. En los grandes aerogeneradores las torres tubulares pueden ser de acero, de celosía o de hormigón. Las torres tubulares tensadas con vientos sólo se utilizan en aerogeneradores pequeños (cargadores de baterías, etc.).

2.7.2 Torres tubulares de acero

Figura 3 Torres tubulares de acero



Fuente <http://angelongo.en.eresmas.com/historiaenergiaeolica.htm>

Los aerogeneradores, de torres tubulares en acero, son fabricados en secciones entre 20 y 30 m. con bridas en cada uno de los extremos y unidos entre sí con pernos “in situ”. Estas torres son construidas de forma tronco-cónicas, es decir, con un diámetro creciente hacia la base, (ver figura 3), esto se hace para aumentar la resistencia y ahorrar material al mismo tiempo.

2.9.2 Torres de celosía

Figura 4 Torre de celosía



Fuente <http://angelongo.en.eresmas.com/historiaenergiaeolica.htm>

Estas torres son fabricadas con perfiles de acero soldados, (ver figura 4). La ventaja de este tipo de torre es su costo, ya que solo requiere la mitad de material en comparación con una torre tubular de la misma rigidez. Su desventaja es su apariencia visual, por tal motivo las torres de celosía han venido desapareciendo en los grandes aerogeneradores modernos.

2.9.3 Torres de mástil tensada por cables

Los aerogeneradores pequeños son construidos generalmente con delgadas torres de mástil, que son sostenidas por cables tensores. (Ver figura 5). La ventaja de este tipo de torre es el ahorro de peso y de costo; pero su desventaja es el difícil acceso a las zonas alrededor de la torre, haciéndolo inapropiado para zonas agrícolas.

Figura 5 Torre de mástil tensado por cables



Fuente <http://angelongo.en.eresmas.com/historiaenergiaeolica.htm>

2.9.4 Soluciones de torres híbridas

Las torres híbridas son aquellas que usan combinaciones de las diferentes torres mencionadas anteriormente. En la figura 6 se observa lo que podría ser un híbrido entre una torre de celosía y una torre tensada por cables

Figura 6 Torre Híbrida



Fuente <http://angelongo.en.eresmas.com/historiaenergiaeolica.htm>

2.9.5 Consideraciones aerodinámicas

Por lo general, es una ventaja situar una torre alta en zonas con una elevada rugosidad del terreno, debido a que la velocidad del viento aumenta acorde nos alejamos del suelo.

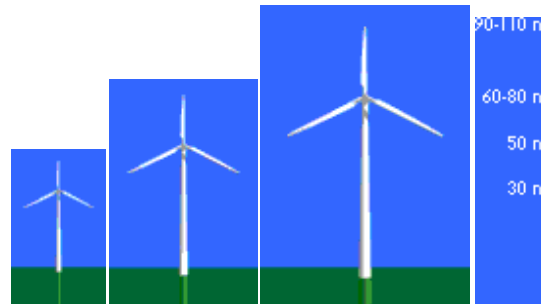
2.9.6 Consideraciones de dinámica estructural

Cuando las palas se encuentran en aerogeneradores con torres demasiadas cortas, se verán sometidas a velocidades de vientos muy diferentes, y por consiguiente, a diferente flexión; cuando la pala este en su posición más elevada y en su posición más baja, producirá un aumento de cargas de fatiga en la turbina.

2.9.7 Elección Entre Torres Altas Y Bajas

Entre más alta sea la torre del aerogenerador se obtendrá más energía que de una torre más pequeña. Como se observa en la figura 7 los aerogeneradores son de 225 Kw, 600 Kw y 1500 Kw, correspondientemente, y con diámetros de rotor de 27, 43 y 60 metros; se observará que las alturas de las torres también son diferentes.

Figura 7 Torres altas y bajas



Fuente: <http://www.windpower.org/ES/tour/wtrb/tower.htm>

Como es claro, un rotor de 60 metros de diámetro no se instalará sobre una torre de 30 metros, y si consideramos su costo, es una mala idea instalar un gran rotor, un gran aerogenerador y un multiplicador, puesto que disponen de velocidades de vientos altas, para lograr hacer que funcione este tipo de aerogenerador.

2.10 Parámetros aerodinámicos

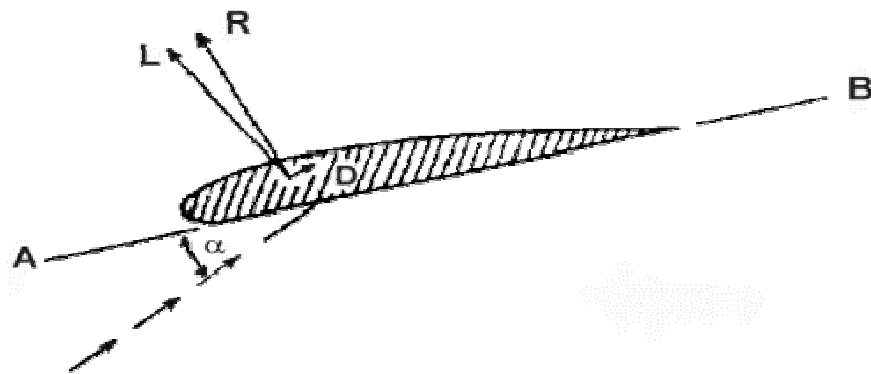
Los parámetros aerodinámicos son parte importante para el estudio y el mejor desarrollo de las aspas, para obtener un óptimo rendimiento de ellas.

2.10.1 Resistencia, sustentación, perfil alar

Como se sabe, si movemos un objeto a través del aire, este ofrecerá una oposición que actúa sobre el objeto en dirección contraria al movimiento. Esto es llamado Drag (resistencia). Los investigadores de los primeros vuelos creyeron que deslizar una superficie plana a través del aire con un pequeño ángulo podría servir como ala. Al realizar estos estudios, se descubrió que las alas eran más eficientes y mejores cuando se les daba una curvatura a estas superficies en vez de hacerlas

planas. Estas superficies curvas se denominan PERFILES ALARES, que producen un efecto de sustentación mayor con una resistencia menor.

Figura 8 Perfil alar



Fuente: http://es.geocities.com/los_caranchos/cap3.htm

En la figura 8 se observa un perfil alar. La línea punteada muestra la dirección desde donde se aproxima el viento al perfil y el ángulo formado entre la línea AB y la dirección del aire denomina α (alfa) o ANGULO DE ATAQUE. Hay que tener muy claro que este ángulo de ataque es simplemente el ángulo con que el ala ataca el aire. El efecto que tiene el aire sobre el perfil es una fuerza sobre el mismo que se llamará FUERZA RESULTANTE en alguna dirección, en la figura 8 se representa por la flecha R. Como es difícil conocer la dirección exacta de R, lo más conveniente es dividirla en dos fuerzas, de las cuales una de ellas es paralela y la otra es perpendicular a la

dirección del aire. La fuerza paralela es la fuerza de resistencia (D) que esta dada por la ecuación: $dR_x = dF_{arr} = \frac{1}{2} \rho C_x v^2 dS$ y la fuerza perpendicular es la fuerza de SUSTENTACIÓN dada por la formula $dR_y = dF_{asc} = \frac{1}{2} \rho C_y v^2 dS$, en la figura 8 se representa con la letra L (lift), al tener estas fuerzas se podrá olvidar de la fuerza R y trabajar con las fuerzas D y L.

Para tener más claro estos conceptos se sacaran individualmente a continuación:

- La **sustentación** es la fuerza que se forma en ángulo recto respecto de la dirección de ataque del aire; esta fuerza es igual y contraria a la dirección de la trayectoria del aspa en el aire.
- La **resistencia** es la fuerza paralela en dicha dirección de ataque del aire
- El **ángulo de ataque** está definido por la cuerda alar y el desplazamiento del aire.

En la actualidad, se encuentran diferentes formas de perfiles que tienen diferentes características que han sido investigadas esmeradamente. Algunos perfiles pueden ser demasiados gruesos y con una gran curvatura que proporciona por lo general una gran sustentación, pero a la vez nos ofrece una gran resistencia, haciéndolos ineficientes a altas velocidades pero muy exitosos a bajas velocidades. Así como los hay gruesos también los encontramos planos y delgados que pueden presentar una superficie inferior convexa.

Hay que tener en cuenta que, cuando el aire fluye a través del ala, lo puede de hacer de dos formas diferentes. Una de ellas es el FLUJO LAMINAR, cada porción del

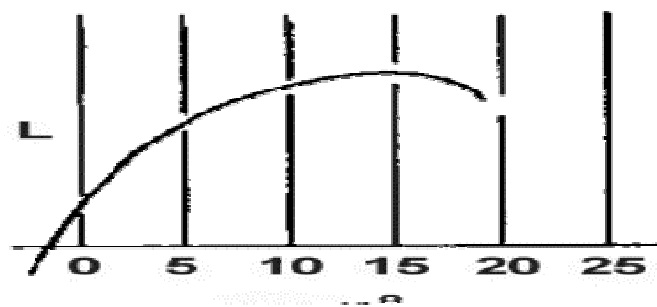
flujo de viento se desliza suavemente sobre el perfil. La viscosidad del aire hace que este se adhiera a la superficie alar. La otra forma como fluye el aire por el ala puede ser de forma TURBULENTA. Aquí la viscosidad del aire hace que se adhiera nuevamente a la superficie y sea arrastrada a lo largo de ella, el problema es que las capas superiores de aire no fluyen suavemente una sobre la otra, haciendo que se formen pequeños remolinos que se desplazan a lo largo del perfil. Estos remolinos forman una especie de sándwich entre la corriente de aire principal y la superficie del ala, a esto se le denomina CAPA LIMITE. Cuando el flujo de la capa limite es turbulento se pierde mucha energía cuando se forman los remolinos que originan una resistencia extra en el perfil.

El flujo del aire generalmente es laminar sobre el aspa, hasta que se encuentra con una sección gruesa donde tiende a volverse turbulento en la capa limite. Las curvas de una sección de un ala laminar son muy suaves, estas características tienden a mantener el flujo laminar sobre una gran parte del ala. El mayor inconveniente que tienen estos perfiles: cualquier cosa que altere la forma del perfil afectará el desarrollo de su desempeño. El principal enemigo de las aspas es la lluvia, estas hacen perder en gran proporción la eficiencia del perfil.

Hay diferentes factores que afectan las fuerzas de sustentación y de arrastre sobre los perfiles. En primer lugar, ambas fuerzas son afectadas por la DENSIDAD del aire. Entre mayor sea la densidad, mayor será la resistencia y la sustentación. En segundo término, las fuerzas de sustentación y de resistencia son afectadas por la VELOCIDAD del aire. Cuando todo se mantiene constante, y hay una variación de velocidad, se encuentra que la resistencia y la sustentación varían exactamente en

razón del cuadrado de la velocidad, es decir, si se duplica la velocidad del viento, la sustentación y la resistencia se multiplicaran por cuatro. En tercer lugar, la sustentación y la resistencia aumentan cuando aumenta la SUPERFICIE del perfil. [6]

Figura 9 Sustentación vs. Angulo de ataque

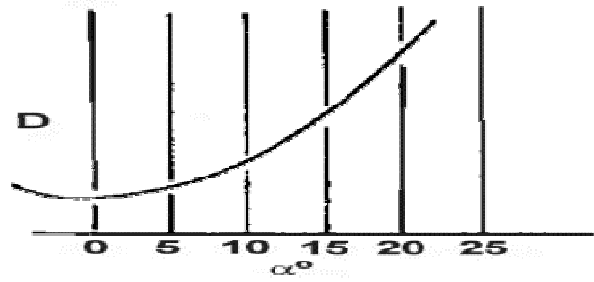


Fuente: http://es.geocities.com/los_caranchos/cap3.htm

En cuarto lugar, y más importante: las fuerzas de sustentación y de resistencia son afectadas por el ANGULO DE ATAQUE. En la figura 9 se muestra cómo varía la sustentación cuando se cambia el valor del ángulo de ataque. Nótese que cuando el ángulo de ataque es igual a 0° hay una pequeña sustentación. Esto se debe a que el perfil alar es poco curvo y presenta un pequeño ángulo de ataque; si se tuviera una sección simétrica a lo largo del perfil, no se encontrara sustentación cuando $\alpha=0$.

Cuando el perfil se encuentra en el punto de pérdida de sustentación, el ángulo en el cual tiene lugar este hecho se denomina ANGULO DE PÉRDIDA. Lo curioso es que la mayoría de los perfiles tienen su ángulo de pérdida alrededor de los 15 o 16 grados, sin importar el tipo de perfil que se esté utilizando.

Figura 10 Arrastre vs. Angulo de ataque



Fuente: http://es.geocities.com/los_caranchos/cap3.htm

En la figura 10 se muestra cómo se comporta la fuerza de resistencia, cuando se varía el ángulo de ataque.

Figura 11 Angulo de Ataque menor que el Angulo de Perdida

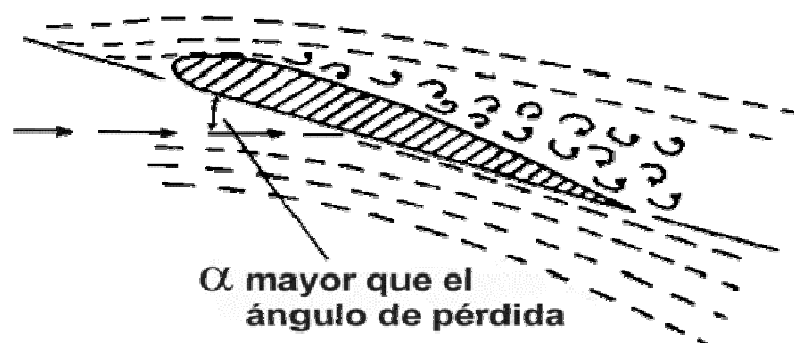


Fuente: http://es.geocities.com/los_caranchos/cap3.htm

En la figura 11 se muestra un perfil con un ángulo de ataque pequeño; el aire pasa ordenadamente por encima y por debajo y forma, en la parte inferior, una zona de alta presión, pero en la parte superior se encuentra una zona de alta presión; en otras palabras, en la parte inferior el aire se obliga a cambiar de dirección hacia abajo por la forma de la superficie inferior del perfil que hace que la fuerza de reacción del aire, sobre el perfil, proporcione parte de la sustentación.

En la parte superior del perfil, el aire se desliza sobre una parábola más pronunciada, lo que requiere una fuerza, para hacer que el aire cambie de dirección; la obtención de esta fuerza se hace por la disminución de la presión que se encuentra en la superficie, en comparación con la presión atmosférica; este aumento de presión en la parte inferior del perfil, en condiciones normales, ayuda con la mayor parte de sustentación. [6]

Figura 12 Ángulo de Ataque mayor que el Ángulo de Pérdida



Fuente: http://es.geocities.com/los_caranchos/cap3.htm

En la figura 12, se observa un perfil alar con un ángulo de ataque mayor que el ángulo de pérdida. Como se observa, en la parte inferior del perfil está cumple con su función, pero el aire en la superficie superior se desintegra en una serie de pequeños remolinos que hacen que la sustentación disminuya considerablemente, aumentando ampliamente la resistencia.

2.11 Ansys CFX

Es una herramienta que es utilizada para preprocesar y posprocesar, con integración a soluciones más fuertes del mercado. Ansys es una nueva solución de generación de modelos geométricos y matemáticos, para aquellas personas que enfrentan problemas difíciles de simulación. El ambiente del programa adopta la tecnología de ICEM CFD con la potencia de la simulación de ANSYS, para crear un camino directo CAD/ CAE/ CFD.

El ambiente de ICEM/CFD crea y corrige geometría, compone modelos matemáticos, rectifica enmallados y aplica condiciones de contorno en el modelo para la simulación. Con una interfaz fácil de utilizar, una integración fuerte de los datos del CAD y una poderosa generación de modelos matemáticos, ICEM CFD es una herramienta única en la preparación del modelo para FEA. ICEM CFD brinda múltiples herramientas de generación del enmallado, capacidad para parametrizar la geometría en mallas hexaédricas, tetraédricas, piramidales y prismáticas estructuradas y no estructuradas. Además, crea multibloques híbridos formados por mallas combinadas con cualquiera de los tipos de elementos anteriores.

2.11.1 Características Principales

Ansys tiene la capacidad de crear la geometría de manera intuitiva, sin olvidar la funcionalidad automatizada, para reformar y reparar los datos que son traídos del CAD. Ansys está dotado de herramientas fuertes para crear cualquier modelo matemático: elementos hexaédricos, tetraédricos, prismáticos, piramidales, cuadráticos, triangulares o elementos lineales. Este software también permite el paso de datos para cálculos que necesiten una interacción fluido-estructura.

Actualmente, con ICEM CFD/AI*ENVIRONMENT, los ingenieros y analistas deben aprender solamente un entorno, para preprocesar y posprocesar los diferentes códigos de análisis utilizados en el mercado. [9]

3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

En este capítulo, se hallan los parámetros que se deben tener en cuenta al momento de diseñar un aerogenerador de eje horizontal.

3.1 DISEÑO DE LA TORRE

Se puede observar que, para la construcción de la torre, hay gran variedad de estructuras, para soportar la góndola y demás partes del aerogenerador: formas tubulares, de celosía, entre otras. Para la realización del proyecto, se escoge la torre de celosía, debido a que ofrece mayor distribución de cargas en toda la estructura, además, es de fácil construcción y de bajo costo. Por otra parte, la torre debe ser liviana, para así poder facilitar las pruebas.

El tipo de torre es de base cuadrada con uniones de forma triangular (ver figura 13), lo que permite sostener altas magnitudes de esfuerzos, generados por el peso de la góndola y el movimiento del eje.

Figura 13 Construcción de la torre



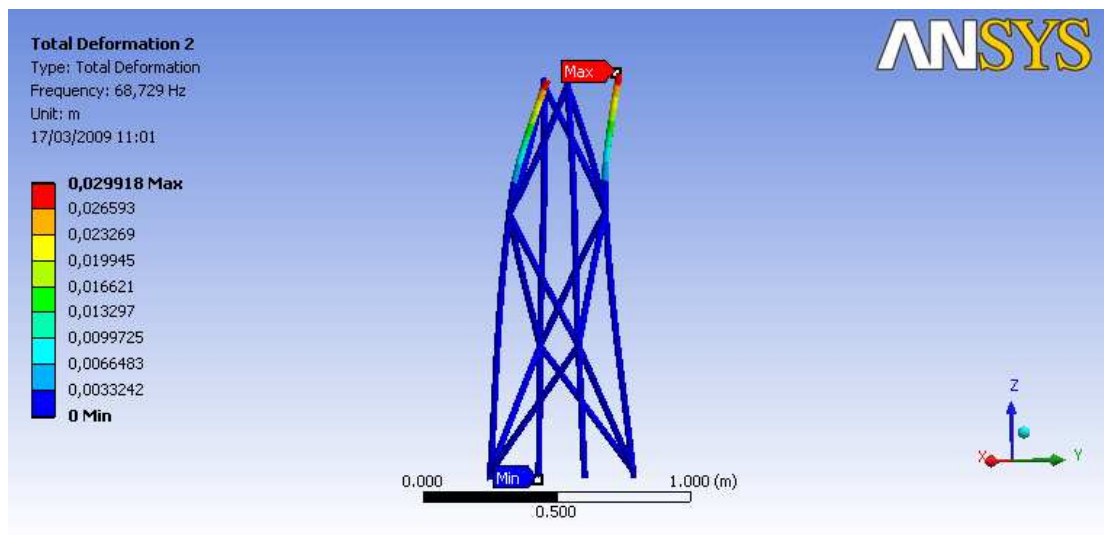
Fuente: Autores del Proyecto

Para la construcción de la torre, se establece una comparación de dos tipos de material, con el fin de escoger el más adecuado para las condiciones que necesita el

aerogenerador. Los materiales objeto de estudio fueron el acero y el aluminio, que se sometieron a una simulación de vibraciones en el programa ANSYS CFX. Obtenidas las deformaciones de cada estructura (ver figura 14 y 15), se observa que la torre tiene una deformación similar para los dos materiales, este fenómeno se hace visible a partir de una frecuencia de 68 Hz, rango que se encuentra por encima al que está sometida la estructura (300 rpm = 32 Hz).

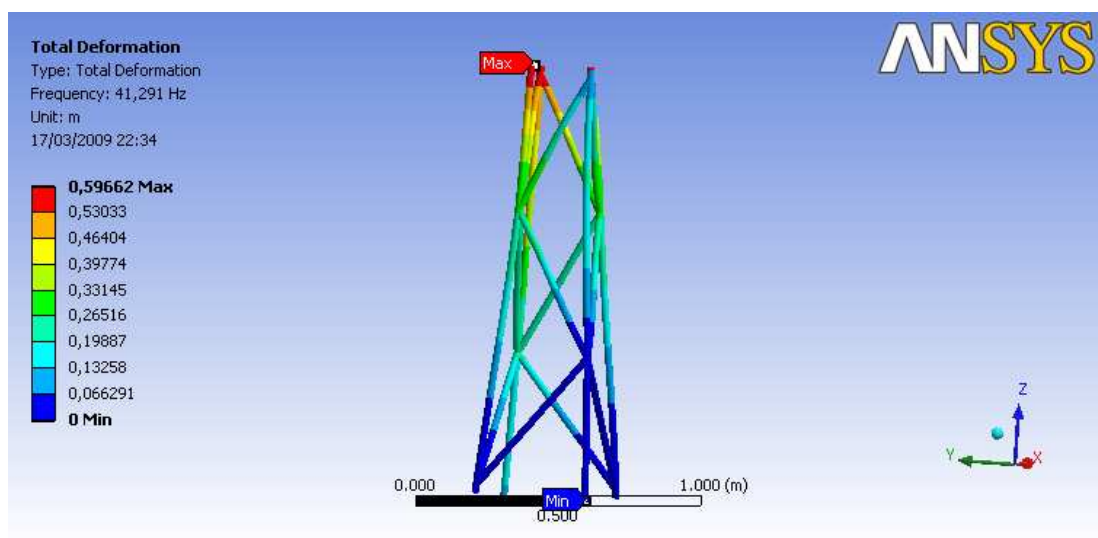
La torre de acero sufre una deformación en su estructura de 0.029918 m., y la estructura de aluminio sufre una deformación de 0.59662 m. cuando se encuentran a una frecuencia de 68,729 Hz y 41,291 Hz respectivamente.

Figura 14 Torre de acero modelada en ANSYS



Fuente: Autores del Proyecto

Figura 15 Torre de aluminio modelada en ANSYS

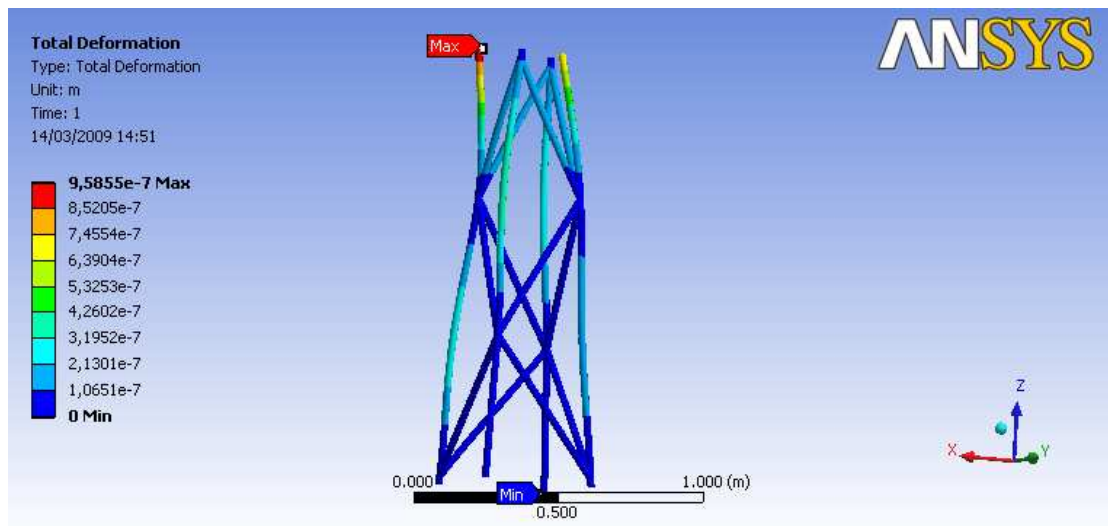


Fuente: Autores del Proyecto

Se evidencia que el material que tiende a deformarse menos es el acero, aunque el aluminio es menos pesado; por lo tanto, el material del cual se realizará la estructura será el acero. Para determinar qué tipo de acero debe ser utilizado, se fijan parámetros de costo y de fácil acceso comercial, por consiguiente, se escoge un tubo cold rolled calibre 18. Para conocer el diámetro del tubo se realizó una simulación de las fuerzas par y fuerza axial, las cuales son las responsables de provocar la deformación en la estructura (ver figura 16).

Las fuerzas que ejercen las hélices no producen grandes esfuerzos, por lo tanto, se determinó construir la torre con tubos de diámetro de 1 pulgada; esta magnitud se escogió gracias a la facilidad que presenta en el montaje de la estructura.

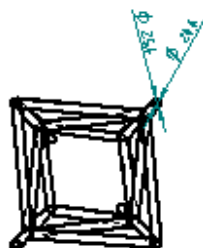
Figura 16 Deformación total de la torre por las fuerzas del aspa



Fuente: Autores Del Proyecto

La torre tiene una altura de 1500 mm, su base está formada por un cuadrado de lado 400 mm.; en la parte más alta de la torre, la espera otra base cuadrada de 200 mm., de lado. Toma así la torre una forma piramidal. (Ver figura 17).

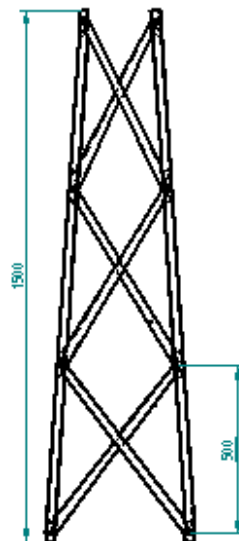
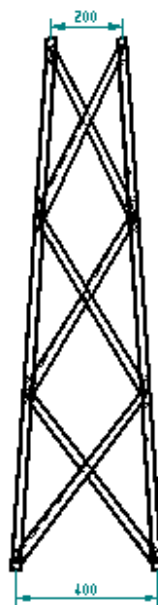
Figura 17 Plano de la torre



Torre de aerogenerador

esc 1 : 10

medidas en mm



Fuente: Autores del Proyecto

3.2 Perfil alar

Elemento del cual se encuentra conformado el aerogenerador, a su vez, es el responsable de recibir la energía del viento y transmitirla al eje de rotación del aeromotor.

3.2.1 Clasificación de los perfiles

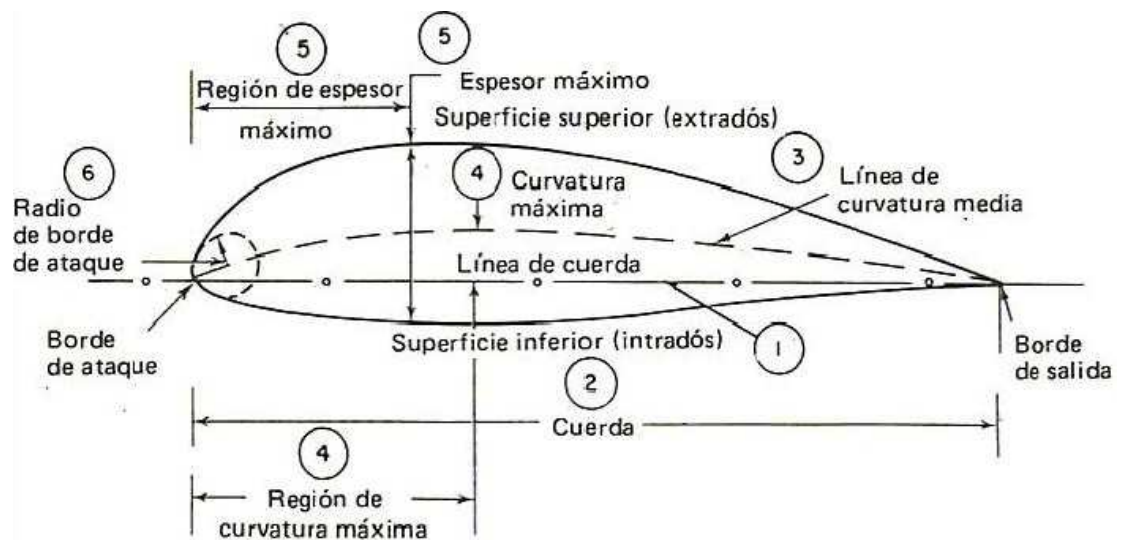
A partir del año 1929, el Comité Nacional de Aeronáutica (NACA) impulsó el desarrollo de los perfiles en los Estados Unidos; fue también precursor de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA). Los primeros perfiles estudiados eran con una nomenclatura de cuatro dígitos que identificaban una característica de cada modelo. El primer dígito da la curvatura en porcentaje de la cuerda; el segundo, la posición de la curvatura máxima en décimas de la cuerda y los dos últimos dígitos, el espesor máximo en porcentaje de la cuerda. Por ejemplo, un perfil NACA 2415 tiene la curvatura máxima del 2 % de la cuerda, situada en el punto del 40 % de la cuerda (medido desde el borde de ataque) y con un espesor máximo del 15 % de la cuerda.

Más adelante se agregó un número, con la llegada de altas velocidades. La primera cifra indica el valor del coeficiente de sustentación ideal del perfil, multiplicado por 20 y dividido por 3. De este diseño se obtiene dos resultados principales. En primer lugar, se desplaza hacia atrás el punto de presión mínima, aumentando con ello la distancia desde el borde de ataque en la que existe flujo laminar y reduciendo la resistencia. [3]

3.2.2 Terminología alar

Para el diseño del perfil se hace necesario conocer la terminología, que se puede observar en la figura 18.

Figura 18 Terminología Alar



Fuente: http://www.oni.escuelas.edu.ar/2003/BUENOS_AIRES/62/tecnolog/perfiles.htm

1. **La línea de cuerda:** línea recta que une el borde de ataque y el borde de salida del perfil.
2. **La cuerda:** longitud de la línea de cuerda. Todas las dimensiones de los perfiles se miden en porcentaje de la cuerda.
3. **La línea de curvatura media:** línea que pasa por el medio del perfil.

4. **Curvatura máxima:** distancia máxima entre la línea de curvatura media y la línea de cuerda. La posición de la curvatura máxima es importante en la determinación de las características aerodinámicas de un perfil.
5. **Espesor máximo:** es la distancia máxima entre la superficie superior e inferior.
6. **Radio del borde de ataque:** es la medida del radio del borde del perfil. [3]

3.2.3 Parámetros De Diseño

Son las condiciones que se debe tener en cuenta al momento de calcular las dimensiones del aspa del aerogenerador.

3.2.4 Relación de velocidad periférica TSR

La relación de velocidad periférica TSR (*Tip-Speed-Ratio*) es un término que suple las RPM del rotor, y este es usado para la comparación de diversas máquinas eólicas, por lo que también se le suele denominar velocidad específica. El TSR indica que la periferia de la pala se encuentra a una velocidad TSR veces mayor que la velocidad del viento v y es la relación entre la velocidad angular del extremo de la pala u y el centro del eje de rotación.

$$TSR = \frac{\text{Velocidad Periferia de la pala}}{\text{Velocidad del viento}} = \frac{R \cdot \omega}{v} = \frac{\pi \cdot R \cdot n}{30 \cdot v}$$

Si se conoce la velocidad del viento (v), el radio de la pala y el número (n) de rpm a las que funciona, se puede calcular el TSR a cualquier distancia (r)

comprendida entre el eje de rotación del rotor y la periferia de la pala, relación entre velocidades que se conoce como SR, y es de la forma:

$$SR = \frac{2\pi r n}{60 k v} = \frac{0.105 r n}{k v}$$

En la que **k** es una constante de ajuste para las magnitudes. [8]

$$k = \begin{cases} 1.47 & \text{cuando la velocidad del viento venga en millas por hora y el radio en ft} \\ 1 & \text{cuando } v \text{ venga en ft/s y el radio en ft} \\ 1 & \text{cuando } v \text{ este en m/s y el radio en m} \\ 3.6 & \text{cuando } v \text{ se encuentre en Km/h y el radio en m} \end{cases}$$

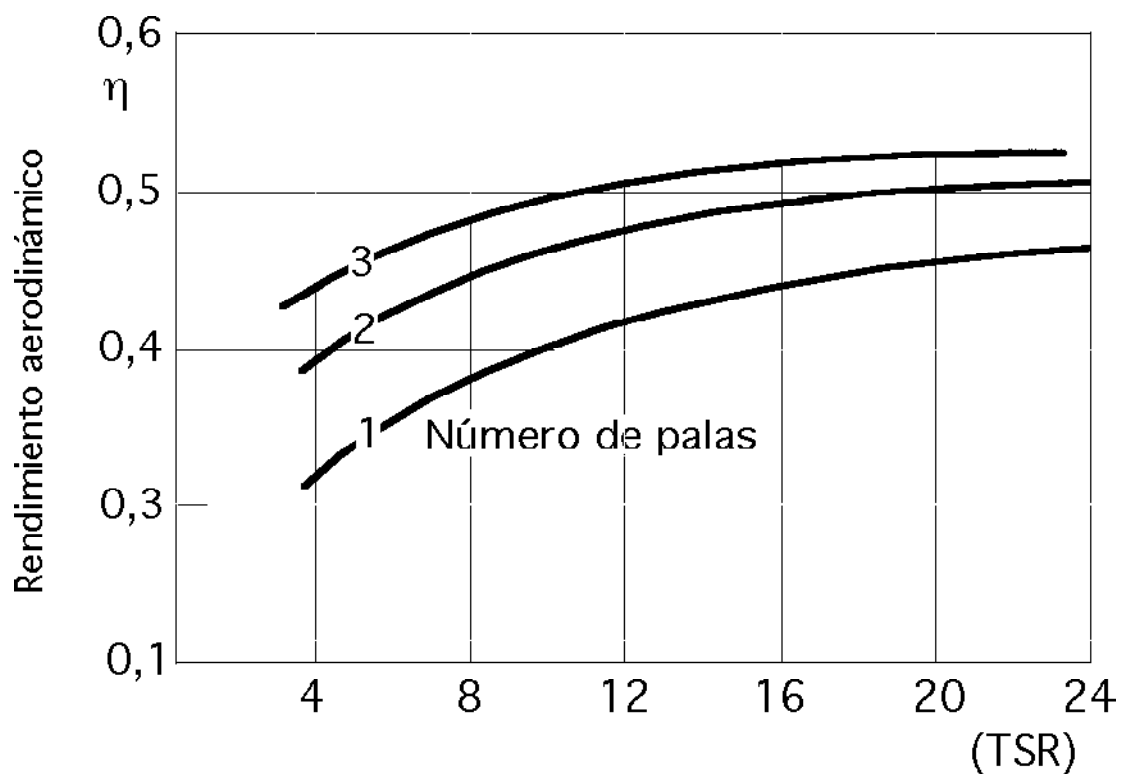
3.2.5 Rendimiento aerodinámico (η)

Se define el rendimiento aerodinámico como la relación entre la potencia de la máquina eólica y la energía del viento que atraviesa el rotor:

$$\eta = \frac{\text{Potencia aerogenerador}}{\text{Potencia del viento}} = \frac{N}{\frac{\rho A v^3}{2}}$$

Para obtener el número de aspas del aeromotor, se observa la gráfica (ver figura 19) que permite determinar la cantidad de hélices que necesita el aerogenerador, para lograr el rendimiento deseado. [8]

Figura 19 Relación entre η , el TSR y el número de palas para d/l cuando tiende a infinito



Fuente: [8]

La figura número 19 permite encontrar el número de aspas indicadas para el aerogenerador, esto mediante los parámetros de TSR y el rendimiento que se desee obtener del sistema.

3.2.6 Área frontal barrida por la pala

El área de barrido (A) es un parámetro que se utiliza en los cálculos de energía eólica.

Para una hélice, esta área es la superficie total barrida por las palas del rotor, perpendicular a la dirección del viento; para un rotor de hélice de eje horizontal, paralelo a la dirección del viento, y diámetro D, el valor de A es:

$$A = \frac{\pi * D^2}{4}$$

Para el cálculo del rotor eólico se hace necesario tener en cuenta lo siguiente:

- a) El área frontal: se debe prefijar y asignar la energía que se desea generar, para así encontrar el diámetro del rotor
- b) Tener en cuenta la cantidad de energía que se encuentra en el ambiente.

Conocidos los datos energéticos, de la máquina y de la fuente energética, se igualan, y se determina el área A barrida por el rotor, y la longitud de las palas. Estos promedios de energía eólica necesarios $N_{\text{útil}}$ vienen dados por la ecuación:

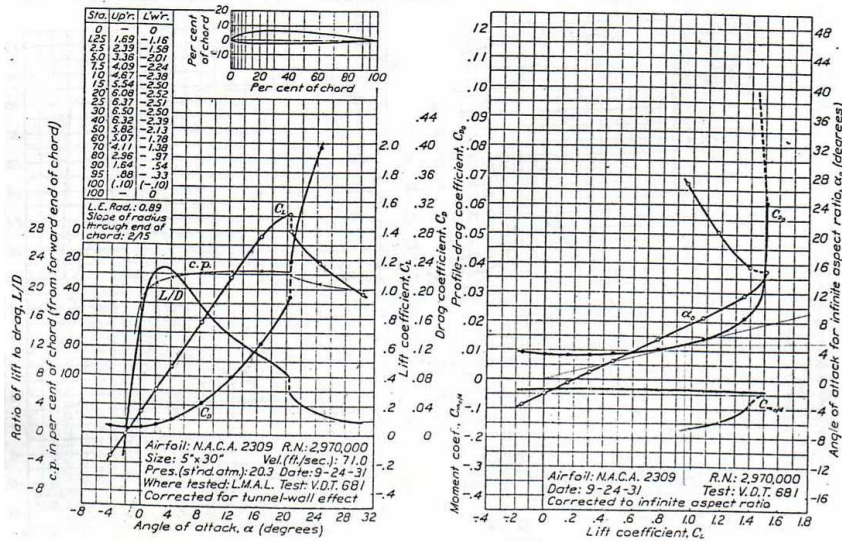
$$A = \frac{2 * N_{\text{útil aerog.}}}{\rho * v^3 * \eta}$$

Siendo: $N_{\text{útil}}$ en Kw, y $\eta = \eta_{\text{aerod}}$ el rendimiento aerodinámico global del aerogenerador.

En la actualidad se cuenta con investigaciones sobre diferentes tipos de formas de perfiles, se recurre a las más conocidas, que son los perfiles NACA. Para escoger el tipo de perfil, se hace necesario consultar las diferentes gráficas que contienen las curvas de los coeficientes de sustentación y arrastre. Con respecto a las gráficas (ver figura 20, 21 y 22) se debe encontrar el perfil que arroje la mayor eficiencia para un caso en particular. Como se necesita las fuerzas de sustentación y arrastre, y estas dependen de los coeficientes, es necesario encontrar en las curvas los valores mayores para escoger el perfil; a su vez, se requiere encontrar la razón mayor de C_y/C_x (coeficiente de sustentación / coeficiente de arrastre) que permite encontrar la mayor eficiencia del perfil y su respectivo ángulo de ataque; gracias a estos parámetros se procede a escoger tres tipos de perfiles como objeto de estudio. Se escoge tres perfiles: NACA 2309, NACA 4412 Y NACA 6321. Para demostrar la variación de la eficiencia, originada por el cambio en la forma del ala, además, se escogen estos perfiles, porque tienden a la unidad en la relación C_y/C_x . [8]

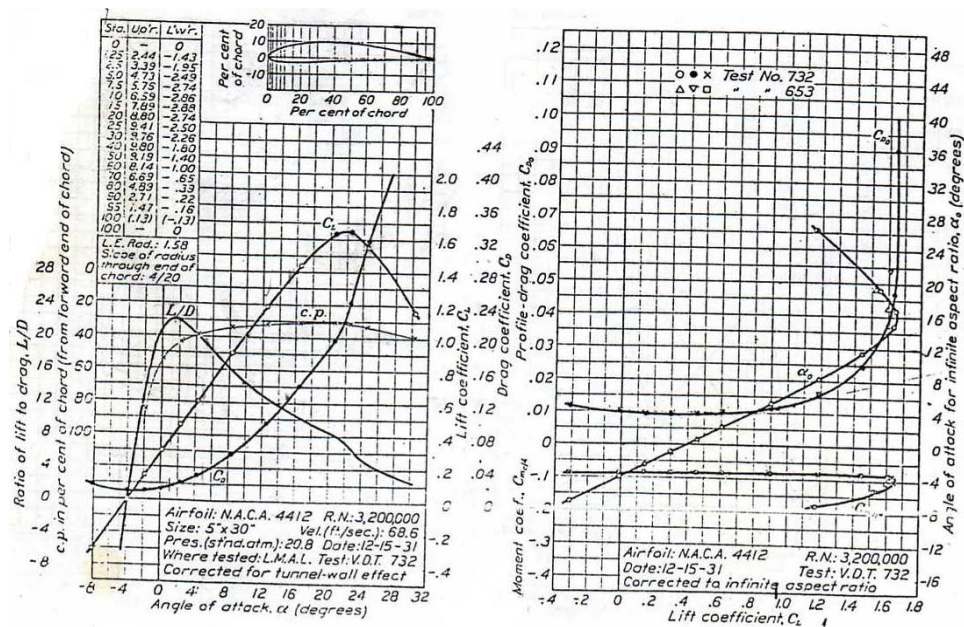
Estos perfiles se modelan en el software ANSYS CFX. Este programa permite crear un ambiente similar al que estará expuesto el aerogenerador, es decir, un ambiente real y así estudiar el comportamiento de las hélices, también, de las diferentes cargas a la que estará sometida el ala.

Figura 20 Curvas Perfil NACA 2309



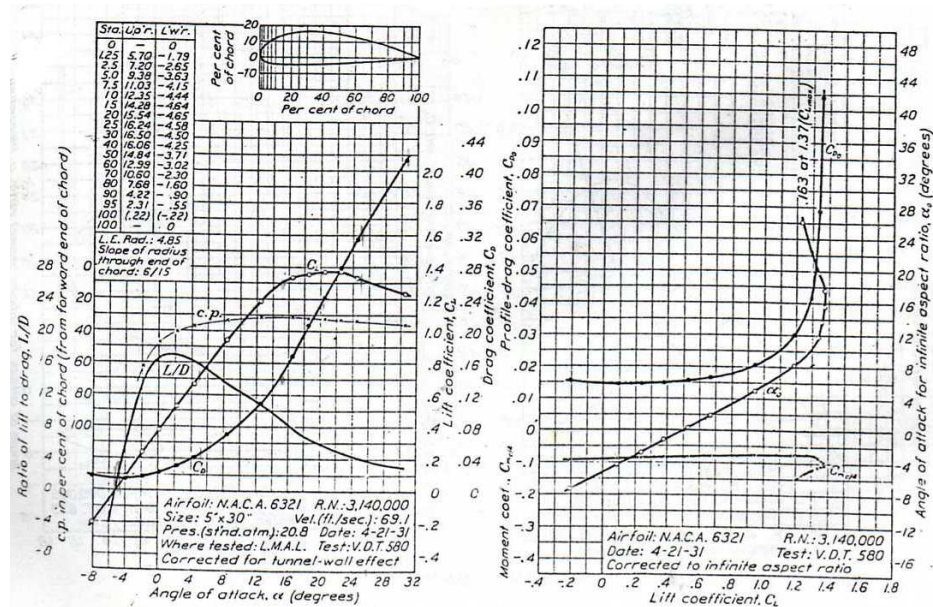
Fuente: [7]

Figura 21 Curvas Perfil NACA 4412



Fuente: [7]

Figura 22 Curvas Perfil NACA 6321



Fuente: [7]

Para el diseño de un aerogenerador, es menester conocer las condiciones a la que va a estar sujeto el aeromotor; por ende, se debe calcular las dimensiones del rotor eólico, ello demanda conocer la velocidad predominante, en el sitio de prueba. Para condiciones del prototipo por construir, se escoge un diámetro de 100 cm, debido al fácil manejo que se debe tener con la máquina, además, se supone una velocidad de viento de 5 m/s.

Se procede a escoger el número de aspas que conforman el rotor (ver figura 18), de aquí el interés por establecer las ventajas y desventajas de los tipos de aerogeneradores, con relación de la cantidad de aspas; se considera el bipala que tiende a mayores velocidades y un menor peso; pero, finalmente, se escoge el tripala,

ya que tiene un mayor par de arranque y una disminución en las vibraciones y velocidad; pero esto se puede mejorar con el tipo de perfil alar que se debe construir, para lograr un óptimo funcionamiento del sistema.

Para el cálculo de las dimensiones del ala se siguen algunos parámetros que se encuentran sujetos al comportamiento del viento, sobre cada punto a lo largo del aspa. Inicialmente, se debe calcular el TSR, que debe ser igual o superior a 3, cálculo sugerido para el diseño de generadores eólicos pequeños.

Tabla 1 Máquinas de viento de eje horizontal

Tipo de maquina	TSR de diseño	Tipo de pala	Cy / Cx
Bombeo de agua	1	Placa plana	10
	1	Placa curvada	20-40
	1	Ala de tela	10-25
Generadores eólicos pequeños	3-4	Perfil simple	10-50
	4-6	Perfil alabeado	20-100
	3-5	Ala de tela	20-30
Generadores eólicos grandes	5-15	Perfil alabeado	20-100

Fuente: [8]

Teniendo un valor de $TSR = 3$ se procede a calcular la longitud del aspa:

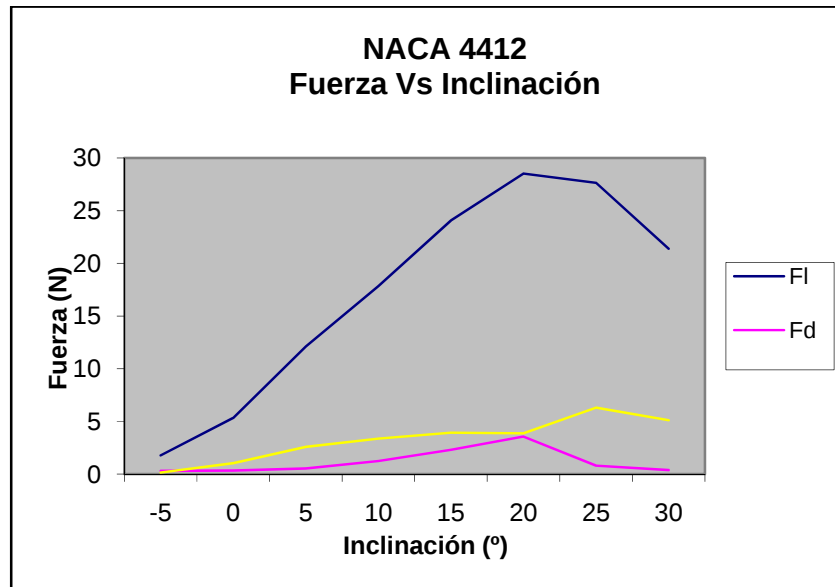
$$L = (30 \cdot V \cdot TSR / n\pi)$$

$$L = (30 \cdot 5 \cdot 3 / 300 \cdot \pi)$$

$$L = 0,47 \text{ m}$$

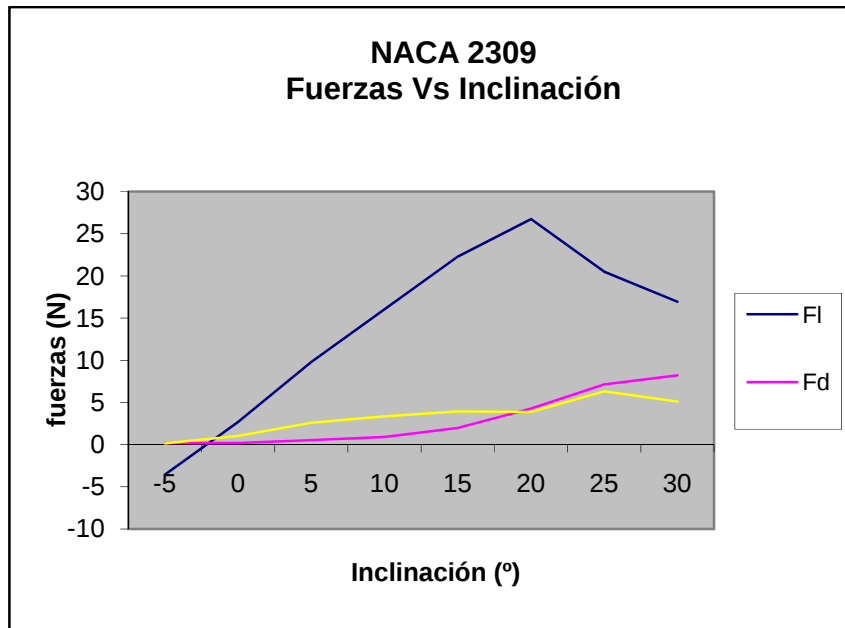
Al obtener la longitud del aspa de 0,47 m., que se sujeta a las condiciones iniciales, donde se propone un largo de aspa de 50 cm., el paso siguiente es escoger la forma del perfil por utilizar. Por lo tanto, se realizan los cálculos según la teoría, con el fin de ver el perfil más adecuado. En las figuras 23, 24 y 25 se observa las fuerzas de sustentación (F_l) y la fuerza de arrastre (F_d), que origina una fuerza resultante que, al ser descompuesta, provoca una fuerza par (F_{par}) la cual se calcula mediante la fórmula $F_{par} = 0.5 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S \cdot (C_y \cdot \text{Sen } \varphi - C_x \cdot \text{Cos } \varphi)$, que es la responsable de generar el movimiento rotativo en los diferentes tipos de perfiles que se determinaron para objeto de estudio.

Figura 23 Fuerza vs inclinación NACA 4412



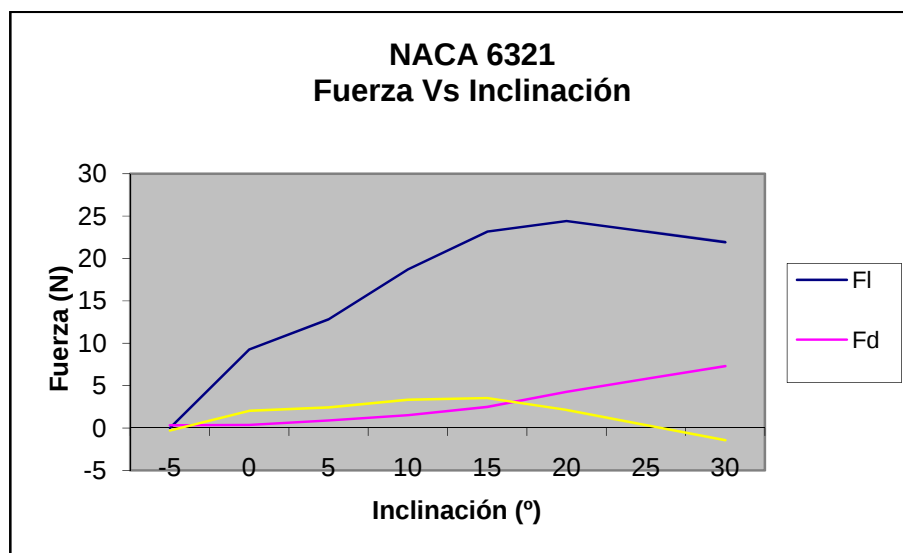
Fuente: Autores del Proyecto

Figura 24 Fuerza vs inclinación NACA 2309



Fuente: Autores del Proyecto

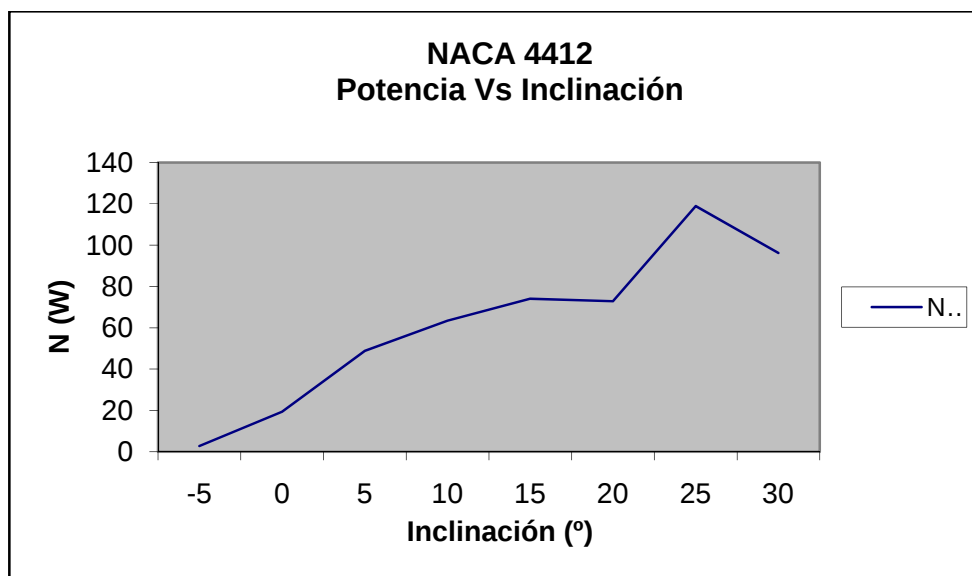
Figura 25 Fuerza vs inclinación NACA6321



Fuente: Autores del Proyecto

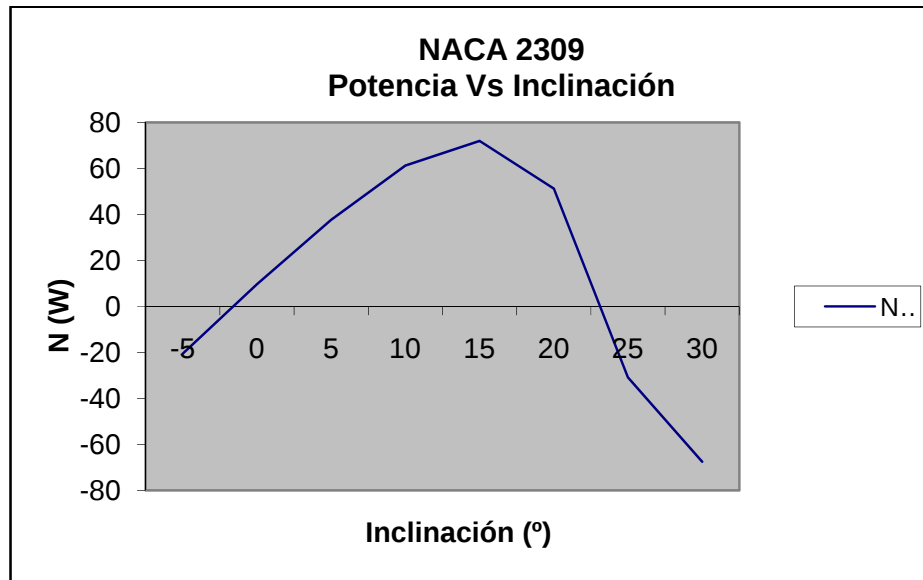
De la fuerza par, se puede calcular la potencia de cada perfil alar, por consiguiente, las figuras 26, 27 y 28 representan la cantidad de potencia que origina el aerogenerador, de las cuales se deduce que la mayor cantidad de potencia es originada por NACA 4412 con 118 W y la menor potencia de 66 W es producida por el NACA 6321.

Figura 26 Potencia Vs Inclinación NACA 4412



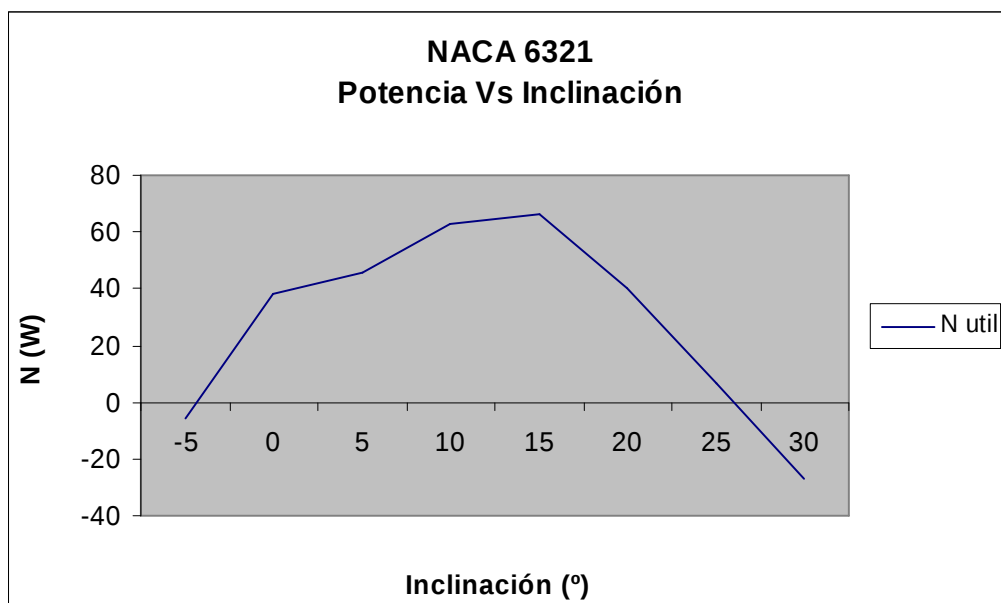
Fuente: Autores del Proyecto

Figura 27 Potencia Vs Inclinación NACA 2309



Fuente: Autores del Proyecto

Figura 28 Potencia Vs Inclinación NACA 6321

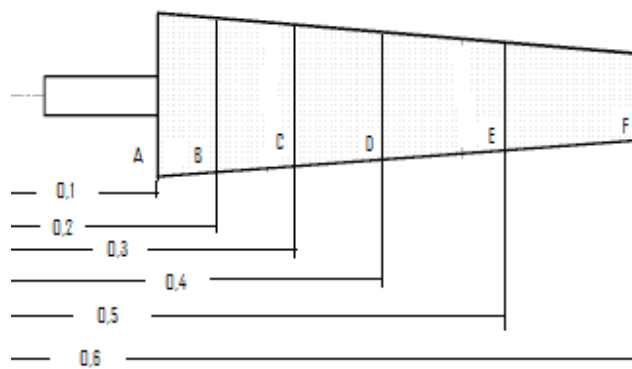


Fuente: Autores de Proyecto

Obtenida la forma del perfil, se procede a realizar una serie de modificaciones al perfil, con el fin de aumentar al máximo la eficiencia del aspa, debido a que el ángulo que se encuentra entre la velocidad angular (w) y la velocidad aparente (V_r) del viento es cambiante a medida que se desplaza por el aspa; esto se debe a que la velocidad radial cambia en cada momento. Por eso, es necesario que el aspa tenga una forma helicoidal, ya que también el ángulo de ataque (α) cambia y es necesario que sea constante en toda el aspa. [4]

Para calcular cuánto es la inclinación del aspa, es necesario dividirla (ver figura 29), para así encontrar el espesor y por ende su flexión.

Figura 29 División del perfil alar



Fuente: Autores del Proyecto

Se observan varios puntos en los que se calcula el SR (*Speed – Ratio*) , que es la velocidad angular en cada punto, además, se calcula la velocidad aparente del

viento, en las divisiones hechas. Con el fin de hallar el ángulo (ϕ) formado por la w y V_r .

Para $TSR = 3$

$$SR = TSR \cdot r/R$$

$$SR_a = 3 \cdot 0.1/0.6 = 0.5$$

$$SR_b = 3 \cdot 0.2/0.6 = 1$$

$$SR_c = 3 \cdot 0.3/0.6 = 1.5$$

$$SR_d = 3 \cdot 0.4/0.6 = 2$$

$$SR_e = 3 \cdot 0.5/0.6 = 2.5$$

$$SR_f = 3 \cdot 0.6/0.6 = 3$$

Se debe encontrar un parámetro SP (Parámetro de Forma) a partir de SR (*Speed – Ratio*), que se pueden obtener de las figuras 31.

Figura 30 Valores ϕ en función del SR

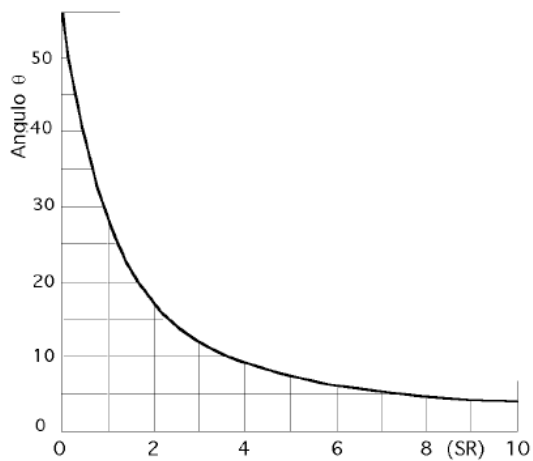
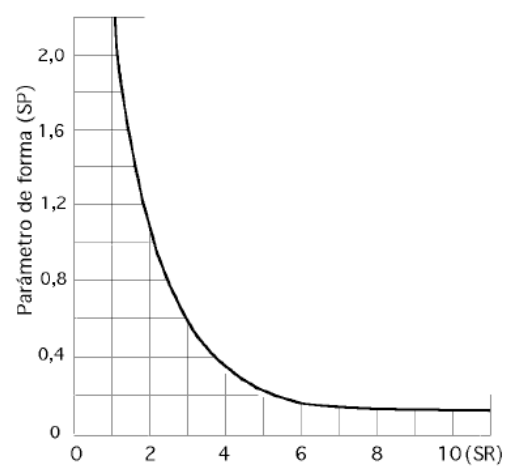


Figura 31 valores del SP vs SR



Fuente: [1]

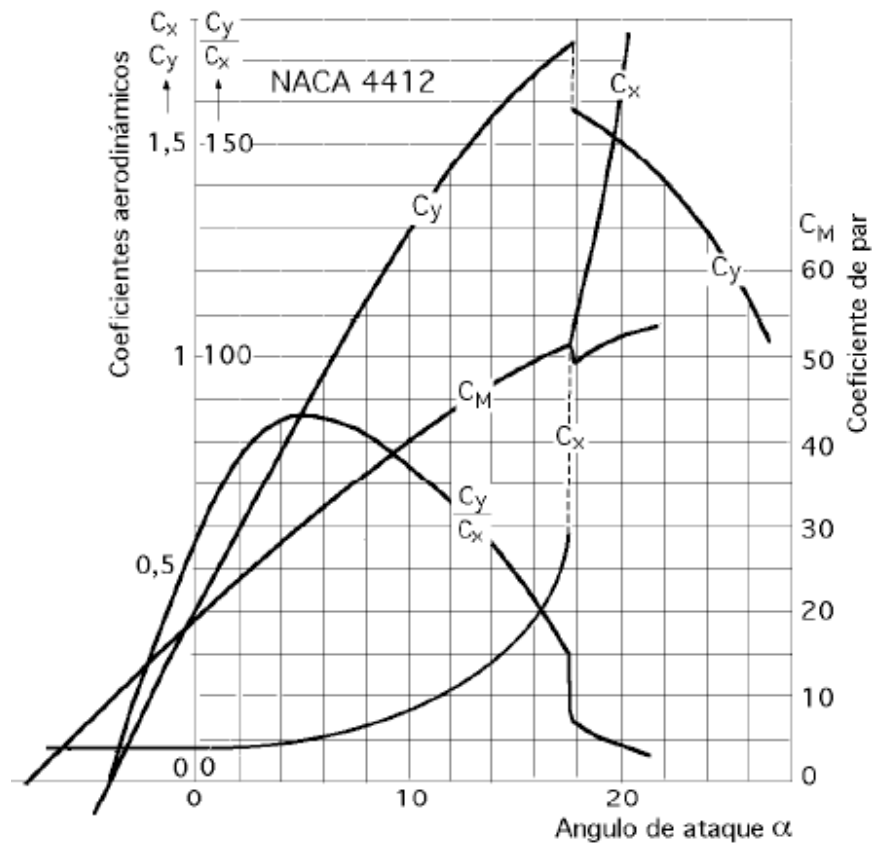
De la figura 30, se toman los valores de ϕ y se tiene que:

SRa (0.5)	$\phi A=36.8^\circ$	SPa=(no se obtiene valor en la figura)
SRb (1)	$\phi B=27.4^\circ$	SPb= 2.2
SRc (1.5)	$\phi C=21.1^\circ$	SPc= 1.42
SRd (2)	$\phi D=17.36^\circ$	SPd= 1.05
SRe (2.5)	$\phi E=14.21^\circ$	SPe= 0.7
SRf (3)	$\phi F=12.1^\circ$	SPf= 0.58

Luego de obtener los parámetros, se encuentran los coeficientes de sustentación y de arrastre, para las condiciones de funcionamiento del aerogenerador; en estos coeficientes será donde C_y/C_x se aproxime a la unidad, ya que ahí se

obtiene la mayor eficiencia. Se puede observar que la curva de coeficientes (ver figura 32) arroja la mayor relación en el punto donde el ángulo de ataque es igual 5 grados.

Figura 32 Coeficientes de arrastre y de sustentación en función de α



Fuente: [1]

Obtenido el ángulo de ataque, se procede a calcular las dimensiones del perfil:

$$L = r * SP / (c * l * z)$$

z: número de aspas

$$\alpha = 5^\circ \quad C_y = 0.68$$

$$L_b = 0.2 * 2.2 / (0.68 * 3) = 0.2156 \text{ m}$$

$$L_c = 0.3 \cdot 1.42 / (0.68^3) = 0.2088 \text{ m}$$

$$L_d = 0.4 \cdot 1.05 / (0.68^3) = 0.2058 \text{ m}$$

$$L_e = 0.5 \cdot 0.7 / (0.68^3) = 0.1715 \text{ m}$$

$$L_f = 0.6 \cdot 0.58 / (0.68^3) = 0.1705 \text{ m}$$

Se observa en la figura 32 $\alpha = 5^\circ$ y $C_y = 0.68$ donde C_y/C_x máx, pero debido a los parámetros de longitud que se debe tener en cuenta, con un ancho de aspa igual a 15 cm., se decide trabajar con $\alpha = 10^\circ$. Tomando este dato, se calcula la longitud de la cuerda en cada punto, además, se debe hacer una corrección del ángulo de ataque con el fin de obtener una constancia del ángulo α a lo largo del aspa.

- Longitud de cuerda con un ángulo ataque de 10 grados

Para $C_y = 0.98$

$$\alpha = 10^\circ$$

$$L_b = 0.2 \cdot 2.2 / (0.98^3) = 0.14965 \text{ m}$$

$$L_c = 0.3 \cdot 1.42 / (0.98^3) = 0.14489 \text{ m}$$

$$L_d = 0.4 \cdot 1.05 / (0.98^3) = 0.14285 \text{ m}$$

$$L_e = 0.5 \cdot 0.7 / (0.98^3) = 0.11904 \text{ m}$$

$$L_f = 0.6 \cdot 0.58 / (0.98^3) = 0.1183 \text{ m}$$

Por último, se realizan los cálculos del ángulo de calaje (β) el cual indicará la inclinación del perfil con relación de la dirección del viento, y esto se hace mediante la corrección del ángulo de ataque, obteniéndose para cada sección transversal la inclinación necesaria en cada punto.

- Corrección del ángulo α

$$\alpha = -\alpha_0 + (C_y/0.11)(1+(3/\Delta L)) \quad \Delta L = R/L$$

$$L = (0.14965+0.14489+0.14285+0.11904+0.1183)/5 = 0.134946$$

$$\Delta L = 0.6/0.134946 = 4.4462$$

$$\alpha = -10^\circ + (0.98/0.11)(1+(3/4.4462)) = 4.92$$

- Angulo de calaje para $\alpha = 10^\circ$ 15 cm de cuerda no variable α

$$\beta_b = 27.4 - 4.9 = 22.5^\circ$$

$$\beta_c = 21.1 - 4.9 = 16.2^\circ$$

$$\beta_d = 17.36 - 4.9 = 12.46^\circ$$

$$\beta_e = 14.21 - 4.9 = 9.31^\circ$$

$$\beta_f = 12.21 - 4.9 = 7.2^\circ$$

- Angulo α variable tenemos un $\beta = 15^\circ$ variado a lo largo del aspa

$$\alpha_b = -10^\circ + (0.98/0.11)(1+3(3/4.0093)) = 5.575^\circ \quad \Delta L_b = 0.6/0.14965 = 4.0093$$

$$\alpha_c = -10^\circ + (0.98/0.11)(1+3(3/4.141)) = 5.36^\circ \quad \Delta L_c = 0.6/0.14489 = 4.1410$$

$$\alpha_d = -10^\circ + (0.98/0.11)(1+3(3/4.2)) = 5.272^\circ \quad \Delta L_d = 0.6/0.14285 = 4.2$$

$$\alpha_e = -10^\circ + (0.98/0.11)(1+3(3/5.0403)) = 4.2117^\circ \quad \Delta L_e = 0.6/0.11904 = 5.0403$$

$$\alpha_f = -10^\circ + (0.98/0.11)(1+3(3/5.0718)) = 4.1788^\circ \quad \Delta L_f = 0.6/0.1183 = 5.0718$$

$$\beta_b = 27.4 - 5.575 = 21.825^\circ$$

$$\beta_c = 21.1 - 5.36 = 15.74^\circ$$

$$\beta_d = 17.36 - 5.272 = 12.088^\circ$$

$$\beta_e = 14.21 - 4.2117 = 9.9983^\circ$$

$$\beta_f = 12.21 - 4.1788 = 7.9212^\circ$$

Calculada las dimensiones del perfil, se procede a escoger el material para la fabricación de las tres aspas (tres por las ventajas que tiene con respecto a las de dos y el parámetro TSR).

Para la fabricación del aspa, se tiene en cuenta diversos criterios como: fácil acceso comercial, su manejo durante la construcción del ala y, sobre todo, que pueda cumplir con características como rigidez, resistencia, bajo peso etc. Los materiales contemplados para la construcción del perfil fueron: una lámina de aluminio, fibra de vidrio, madera y poliuretano. Los tres primeros materiales se descartaron debido a su difícil manejo en la construcción, alto valor económico y la dificultad que presenta para construir el perfil. Para el proyecto, se escogió el último material (poliuretano) gracias a que su moldeo es de menor dificultad con relación de los otros, a su bajo costo y que ofrece la suficiente resistencia, sin olvidar la menor densidad que tiene con respecto de los otros y que contribuye a tener menor peso. En la tabla 2 se observa las propiedades del material escogido.

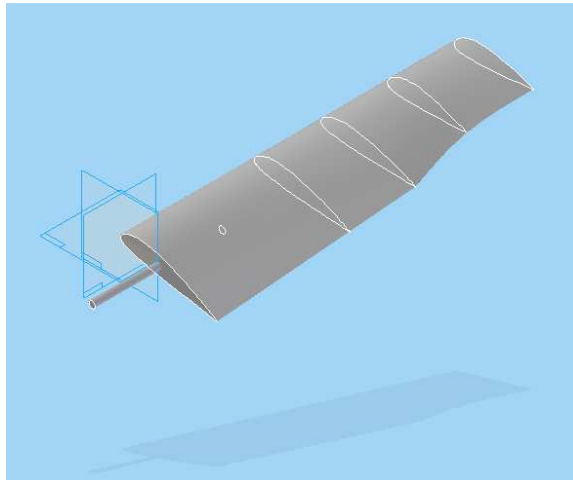
Tabla 2 Datos técnicos del poliuretano

Tipo de material	Resina de poliuretano bicomponente	
	Comp. A:	Comp. B:
Densidad	Approx. 1.01 g/cm ³	Approx. 1,15 g/cm ³
Color	Incoloro	Marron
Viscosidad(23°C)	80 mPa s	
Temperatura de aplicacion	> 5°C	
Dureza Shore	Aprox 35	
Tiempo de aplicación	Approx. 90 min	
Aplicacion	Inyeccion con bomba de 1 o 2 comp.	
Almacenamiento	Entre 5°C – 30°C en embalajes originales libres de humedad	

Fuente www.webac.de

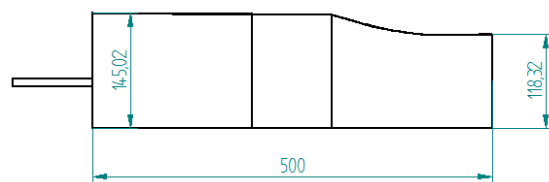
Después de haber sido elegido el material del aspa se comienza el proceso de construcción del perfil. Para la construcción del aspa, se hace un bosquejo de la forma del perfil; por lo tanto, se hace una imagen 3D de cada uno de las hélices (ver figura 33, 35 y 37) en el software SOLID EDGE; creadas las imágenes en este programa, se facilita la obtención de los diferentes planos (ver figura 34, 36 y 38) los cuales son utilizados para la construcción.

Figura 33 Perfil NACA 2309 SOLID EDGE



Fuente: Autores del Proyecto

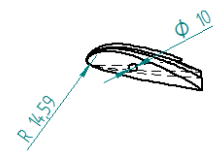
Figura 34 Plano Perfil NACA 2309 SOLID EDGE



Perfil naca 2309

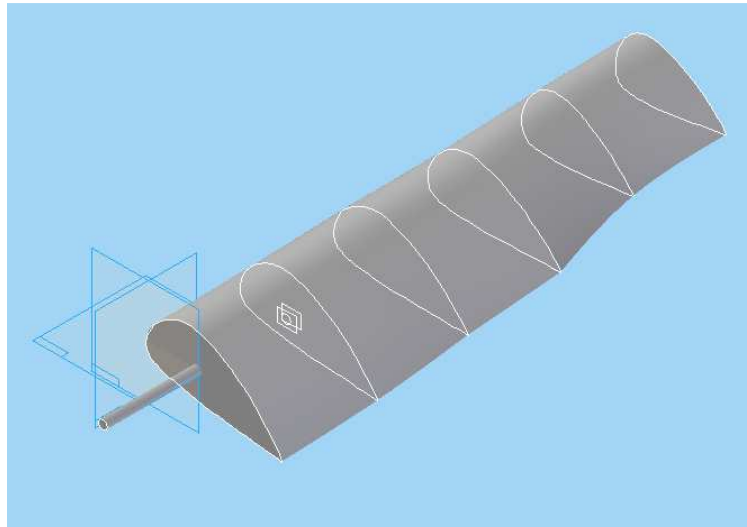
Esc. 1 : 5

medida en mm



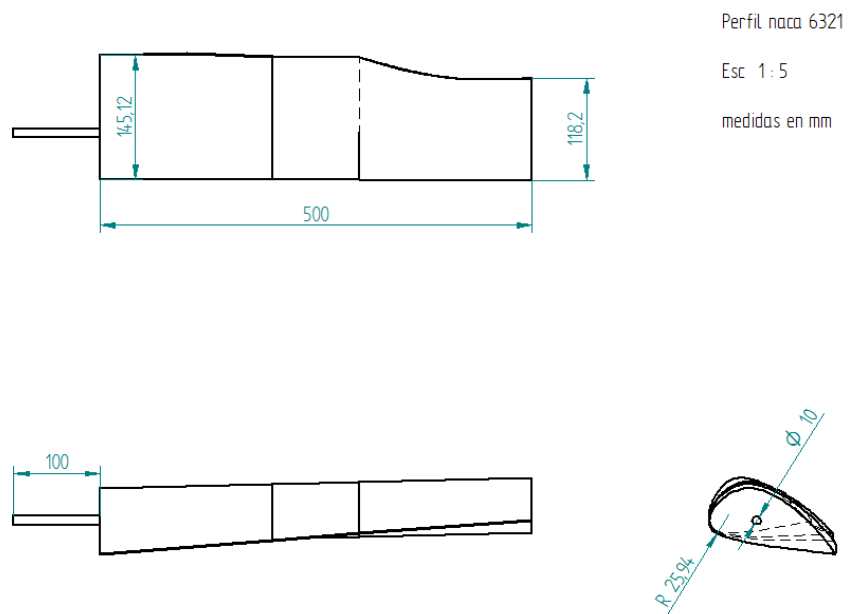
Fuente: Autores del Proyecto

Figura 35 Perfil NACA 6321 SOLID EDGE



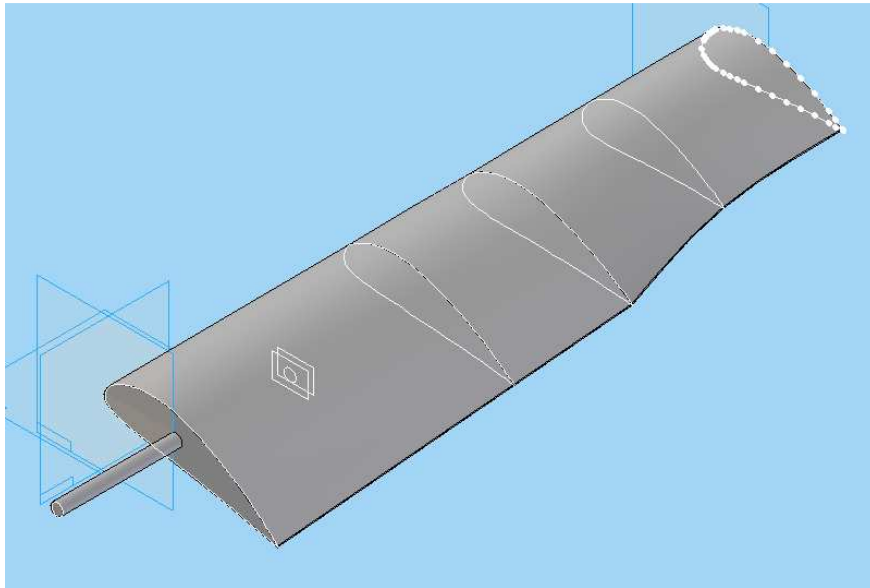
Fuente: Autores del Proyecto

Figura 36 Plano Perfil NACA 6321 SOLID EDGE



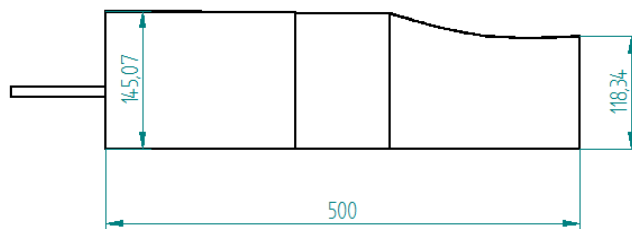
Fuente: Autores del Proyecto

Figura 37 Perfil NACA 4412 SOLID EDGE



Fuente: Autores del Proyecto

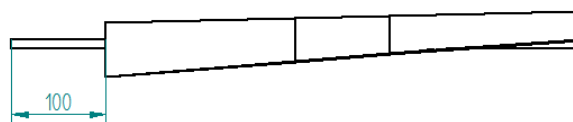
Figura 38 Plano Perfil NACA 4412 SOLID EDGE



Perfil alar

Esc 1: 5

medidas en mm



Fuente: Autores del Proyecto

En la figuras 39 y 40, se muestra la estructura interna del aspa y se observa que las secciones transversales varían de tamaño, esto se hace con el fin de aumentar la eficiencia del sistema, además, se nota que en cada sección hay una inclinación que se debe al ángulo de calaje. Luego de construido el armazón, se procede a rellenarlo de poliuretano.

Figura 39 Armazón perfil de ala



Fuente: Autores del Proyecto

Figura 40 Perfil de ala



Fuente: Autores del Proyecto

En la figura 41, se muestra la estructura recubierta con poliuretano debidamente moldeado; pero como se necesita que el perfil sea lo más liviano posible, se procede a realizar un molde en yeso, para hacer el aspa en un solo material.

Figura 41 Perfil De Ala Recubierto Con Poliuretano



Fuente: Autores del proyecto

En las figuras 42 y 43, se observa el molde del perfil en yeso que se rellenará con poliuretano. Luego se retira el molde de yeso, se saca el perfil y se retira los residuos alrededor del aspa, se pulen los defectos para darle un mejor aspecto y con este último paso, termina la fabricación del ala del aerogenerador.

Figura 42 Molde abierto en yeso del perfil de ala



Fuente: Autores del Proyecto

Figura 43 Molde cerrado en yeso del perfil de ala



Fuente: Autores del Proyecto

3.3 DISEÑO DEL ROTOR

Para el diseño del aerogenerador, se realizan los respectivos cálculos, para obtener las dimensiones necesarias que lleven al correcto funcionamiento del sistema.

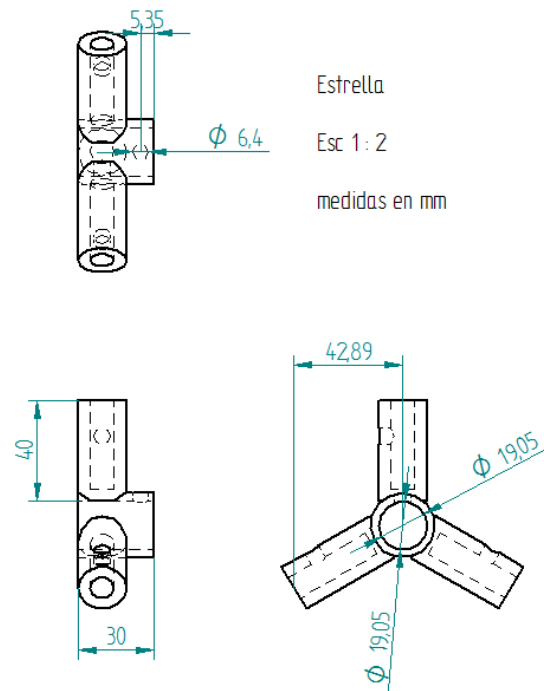
- Peso estrella:

Para el cálculo del volumen es necesario conocer las dimensiones de la estrella, dimensiones que se muestran en la figura 44.

$$V (\text{volumen}) = 5.3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$\rho (\text{densidad}) = 7800 \text{ Kg/m}^3$$

Figura 44 Plano de la estrella



Fuente Autores del Proyecto

$$W \text{ (peso) est} = 7800 \times 5.3 \times 10^{-4} \times 9.81$$

$$W_{\text{est}} = 1.94 \text{ N}$$

- Peso de aspas

$$\rho = 1.08 \text{ (g/cm}^3\text{)} \times (\text{Kg/1000g}) \times (10^6 \text{cm}^3/\text{m}^3)$$

$$\rho = 10.8 \text{ Kg/m}^3$$

$$L \text{ (longitud)} = 50 \text{ cm}$$

$$A \text{ (área)} = 57 \text{ cm}^2 = 5.7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V = 2.85 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$W_{asp} = 10.8 \cdot 2.85 \cdot 10^{-3} \cdot 9.81$$

$$W_{asp} = 3.0164 \text{ N}$$

$$W_{asp \text{ total}} = 3 \cdot 3.0164 = 9.04 \text{ N}$$

$$\text{Peso total} = 40.55 + 1.94 + 9.04 =$$

$$P_{\text{total}} = 52 \text{ N}$$

$$\sigma \text{ (esfuerzo)} = P/A$$

$$\text{Esfuerzo ultimo sacado de tabla de esfuerzos } \sigma_{\text{ultimo}} = 145 \cdot 10^6 \text{ Pa. [3]}$$

$$A = P / \sigma = 52 / 145 \cdot 10^6$$

$$A = 3.586 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$$

$$A = \pi \cdot r^2$$

$$r \text{ (radio eje)} = \sqrt{(A / \pi)} = \sqrt{(3.586 \cdot 10^{-7} / \pi)}$$

$$r = 3.3786 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

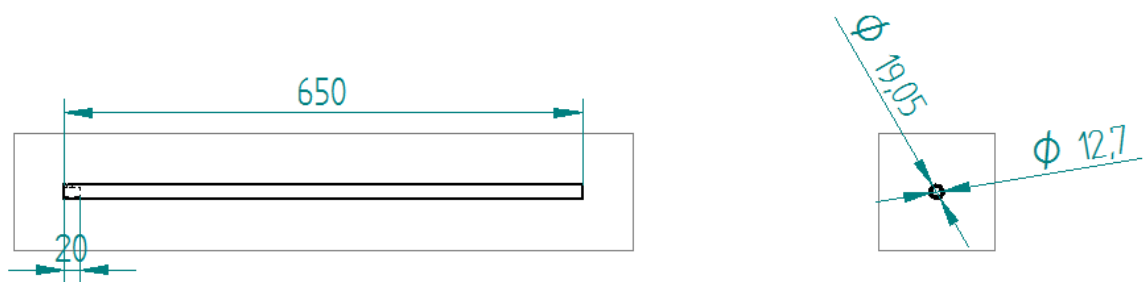
Como se observa en los cálculos, el eje es de un diámetro mínimo, por lo tanto se considera las dimensiones que se muestran en la figura 45.

Figura 45 Plano del eje

Eje aerogenerador

Esc 1 : 10

medidas en mm



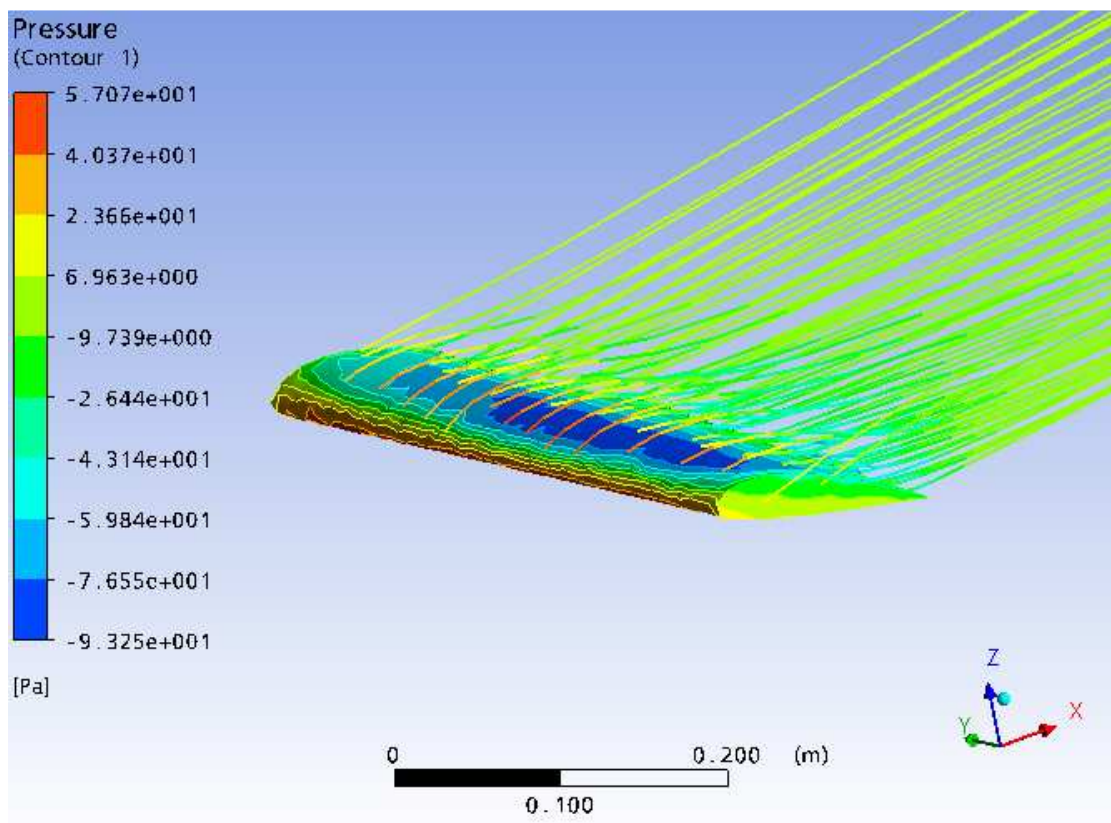
Fuente: Autores del Proyecto

Debido a que se necesita un eje que soporte torsión, se determina escoger un cilindro macizo de acero 1045 de fácil acceso comercial, que se maquina con el objetivo de unirlo al eje del alternador; además, la longitud se establece de esta manera, para evitar que la turbulencia que se presenta en las aspas altere la estabilidad de la torre. El alternador es de un Chevrolet al cual se le hacen modificaciones, con el fin de adaptarlo a las necesidades que se requieren.

4. DATOS TEÓRICOS DEL FUNCIONAMIENTO DEL AEROGENERADOR

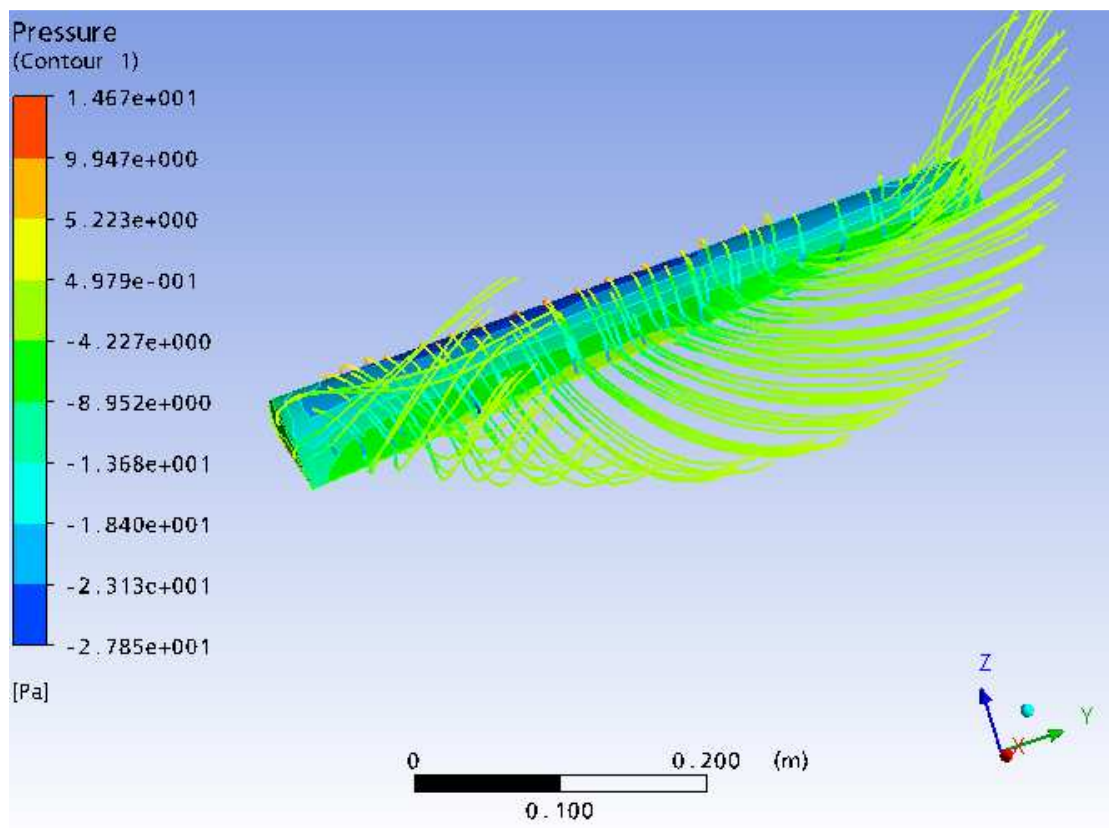
Aquí se detalla la simulación en software de ANSYS CFX de tres tipos de perfiles (ver figuras 46, 47 y 48), con el fin de encontrar el más adecuado para un aerogenerador.

Figura 46 Simulación Perfil NACA 2309 En Ansys CFX



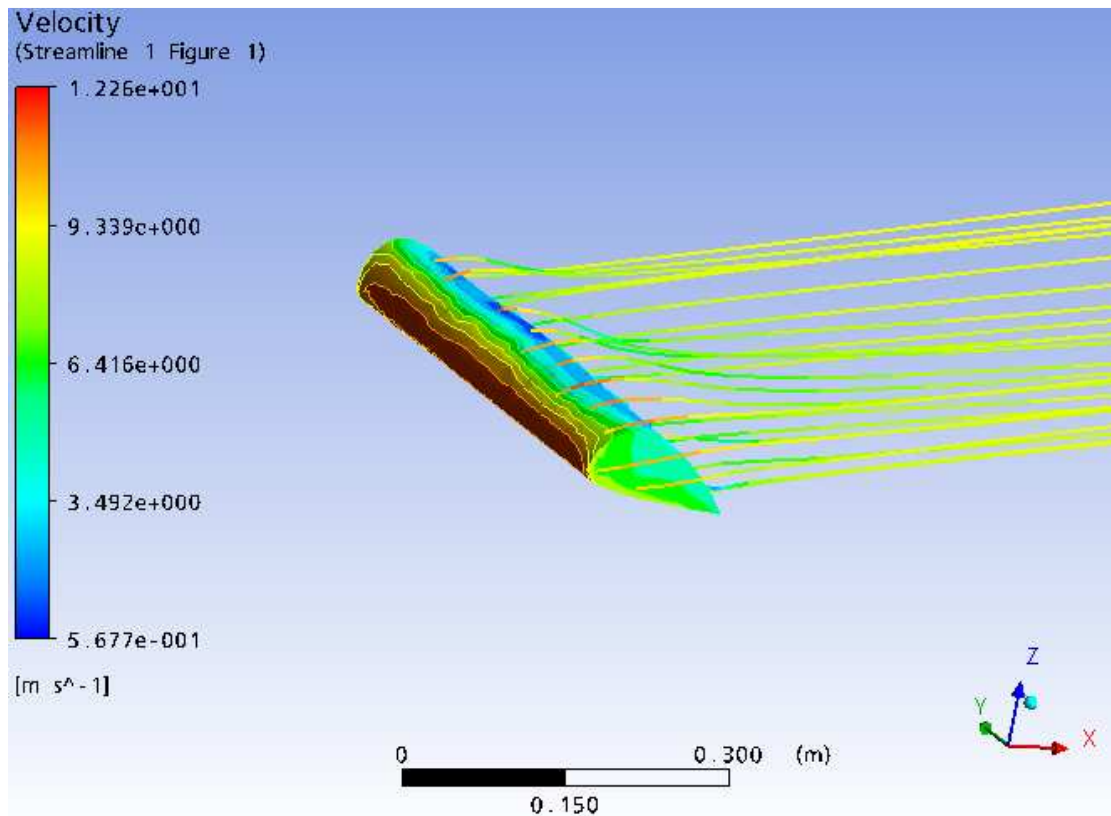
Fuente Autores Del Proyecto

Figura 47 Simulación Perfil NACA 4412 En Ansys CFX



Fuente Autores Del Proyecto

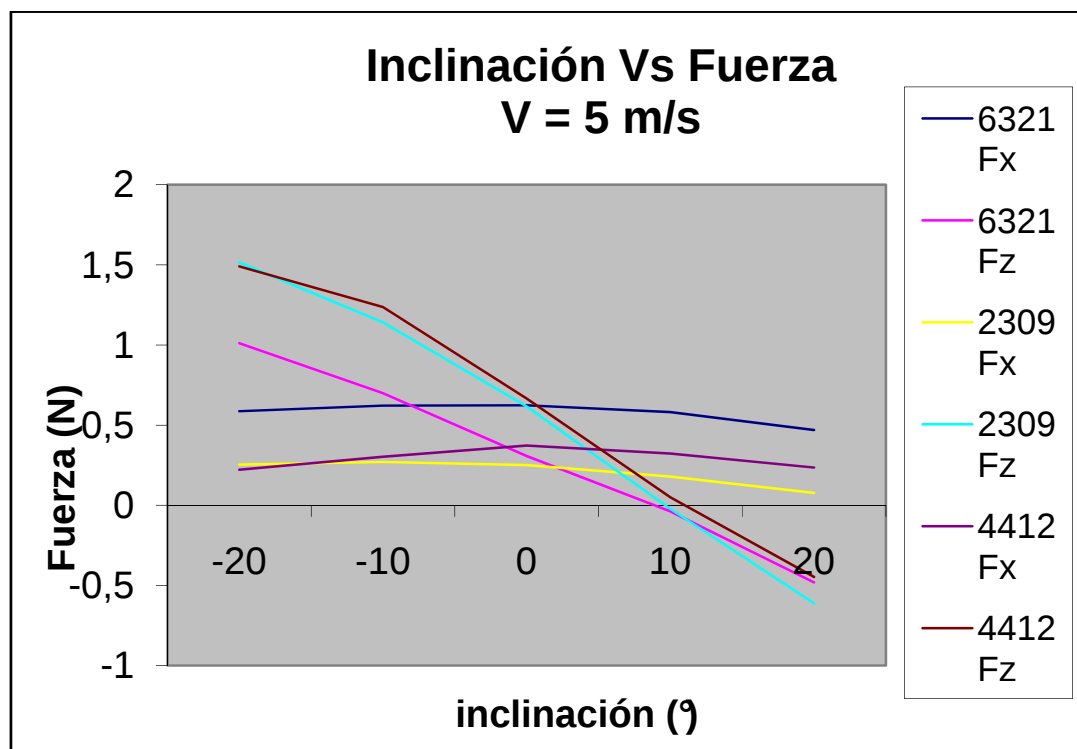
Figura 48 Simulación Perfil NACA 6321 En ANSYS CFX



Dado los resultados de la simulación en ANSYS CFX ,se realizan las gráficas que muestran el comportamiento de la fuerza axial (F_x), esta es una fuerza inútil que tiende a desplazar el rotor en el sentido del viento y una fuerza par (F_z), que es la encargada de dar el giro al eje. [4]

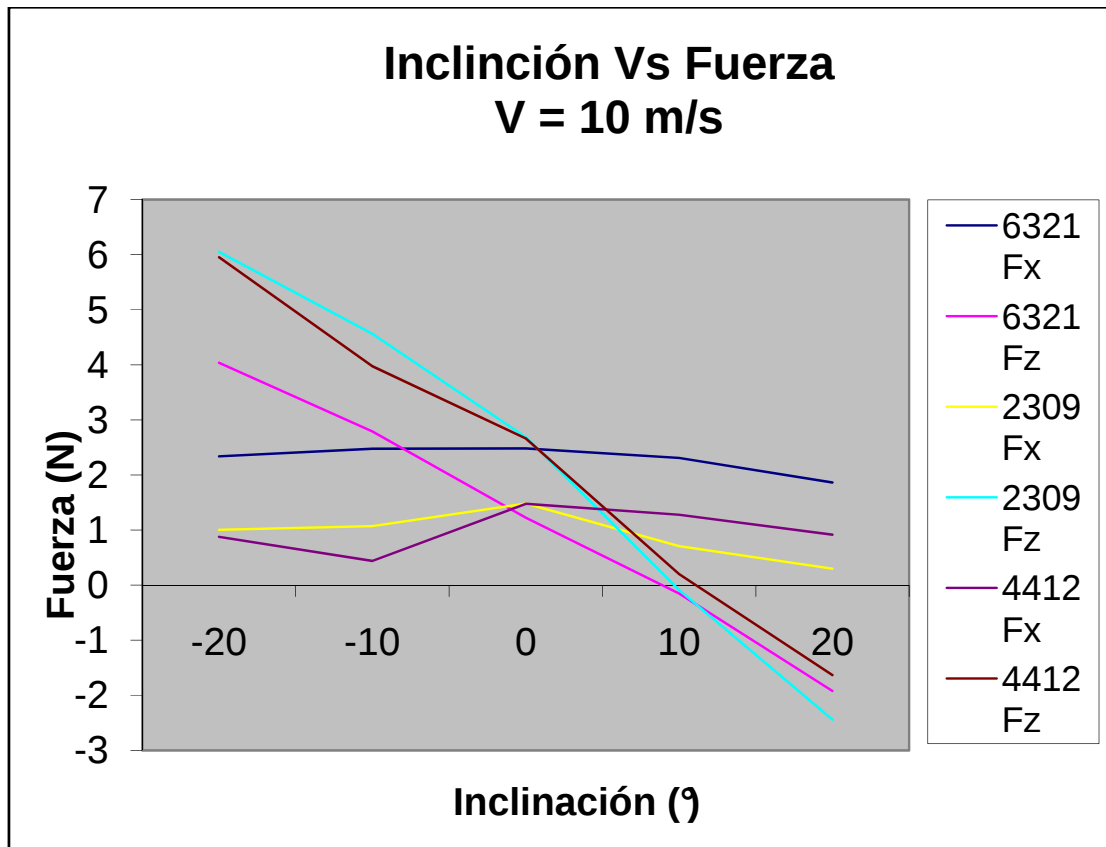
En las figuras 49 y 50, se observan las curvas de las fuerzas a medida que varía la inclinación del perfil y a su vez la velocidad del viento. Allí se nota que el perfil NACA 4412 posee la mayor fuerza par, por lo contrario, el NACA 6321 es el menos eficiente de los tres perfiles, aunque muestra una constancia de F_z , a medida que cambia la inclinación.

Figura 49 Inclinación vs fuerza a una velocidad de 5 m/s



Fuente Autores del Proyecto

Figura 50 Inclinación vs fuerza velocidad 10 m/s



Fuente autores del proyecto

Se tabulan los resultados obtenidos, con el fin de hacer una comparación teórico-experimental. Realizada la simulación se muestran los resultados del comportamiento que tiene el perfil con respecto a la velocidad y la inclinación. Los datos se observan en las tablas 3, 4 Y 5.

Tabla 3 Fuerzas en el perfil Naca 6321

PERFIL NACA 6321				
INCLINACION EN GRADOS	VELOCIDAD m/s	FUERZA X (AXIAL) [N]	FUERZA Y (Largo eje) [N]	FUERZA Z (PAR) [N]
0	5	0.624015	-0.00473693	0.307505
0	10	2.48048	-0.0187407	1.22342
10	5	0.580856	0.00481066	-0.039034
10	10	2.30922	0.0192721	-0.156102
20	5	0.468972	0.0156572	-0.481385
20	10	1.86216	0.0626168	-1.92251
-10	5	0.621964	-0.0161884	0.69939
-10	10	2.47349	-0.0646565	2.78809
-20	5	0.587306	-0.0247385	1.01102
-20	10	2.33683	-0.0986985	4.03363

Fuente autores del proyecto

Tabla 4 Fuerzas en el perfil Naca 2309

PERFIL NACA 2309				
INCLINACION EN GRADOS	VELOCIDAD m/s	FUERZA X (AXIAL) [N]	FUERZA Y (Largo eje) [N]	FUERZA Z (PAR) [N]
0	5	0.250497	-0.0192576	0.616009
0	10	1.48078	-0.0868687	2.68413
10	5	0.17907	-0.00231324	-0.0226819
10	10	0.705372	-0.00931135	-0.0890532
20	5	0.0765784	0.0144235	-0.611254
20	10	0.296048	0.0576156	-2.44172
-10	5	0.270417	-0.0339655	1.14081
-10	10	1.07104	-0.135826	4.56106
-20	5	0.25341	-0.0443407	1.51499
-20	10	1.00311	-0.177038	6.05007

Fuente autores del proyecto

Tabla 5 Fuerzas en el perfil Naca 4412

PERFIL NACA 4412				
INCLINACION EN GRADOS	VELOCIDAD m/s	FUERZA X (AXIAL) [N]	FUERZA Y (Largo eje) [N]	FUERZA Z (PAR) [N]
0	5	0.371805	-0.0213272	0.664841
0	10	1.47512	-0.0853659	2.661
10	5	0.322721	-0.00513417	0.0495788
10	10	1.27836	-0.0206113	0.199917
20	5	0.235407	0.010233	-0.447726
20	10	0.914136	0.0205622	-1.63463
-10	5	0.302204	-0.0385021	1.23602
-10	10	0.436881	-0.0475394	3.97149
-20	5	0.221553	-0.0449768	1.48944
-20	10	0.874583	-0.179773	5.95002

Fuente autores del proyecto

En los datos anteriores se evidencia que el perfil con mayor fuerza par es el NACA 4412, a una velocidad de 5 m/s, mientras que a 10 m/s, el que arroja la más alta F_{par} es el 2309. Para escoger el tipo de perfil, es menester el rango de velocidades del medio, ya que estas serían realmente las condiciones a las que va estar sujeto el aerogenerador. Otra observación de los datos obtenidos de la simulación: el menos indicado, para cualquier velocidad, es el NACA 6321, puesto que posee la menor fuerza par.

5. DATOS OBTENIDOS DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES REALIZADAS A LOS DIFERENTES PERFILES

Con el fin de realizar una comparación con la teoría, se escoge el ambiente al que estará sometido el aerogenerador, debido a que Bucaramanga, y su área metropolitana, no posee una constancia en sus vientos; además, la energía cinética, ocasionada por la corriente de aire, no es suficiente para obtener datos precisos, por consiguiente, se determina realizar las pruebas en un laboratorio, con el fin de simular la variación de velocidad con relación de la inclinación del perfil.

Para la realización de la prueba, se utiliza un ventilador de 68 cm de diámetro, con un variador de velocidad. Como instrumento de medición, en primer lugar, se utiliza un anemómetro, esto para calcular la velocidad del viento producida por el ventilador; en segundo lugar, para la medida de las RPM del rotor, se utiliza un tacómetro, y por último, se realiza la medición de voltaje y corriente por medio de un multímetro.

Se realizan las pruebas correspondientes en el laboratorio y, luego, se procede a su respectiva tabulación, que se encuentra en las tablas de la 6 a la 26.

Tabla 6 Datos Obtenidos Perfil Naca 4412 Inclinación -40 Grados

NACA 4412			
INCLINACION – 40 GRADOS			
VELOCIDAD m/s	RPM	VOLTAJE V	CORRIENTE mA
5	87	0.3	0.41
10	160	1.2	1.4

Fuente autores del proyecto

Tabla 7 Datos Obtenidos Perfil Naca 4412 Inclinación -30 Grados

NACA 4412			
INCLINACION – 30 GRADOS			
VELOCIDAD m/s	RPM	VOLTAJE V	CORRIENTE mA
5	74	0.11	0.13
10	130	0.74	0.9

Fuente autores del proyecto

Tabla 8 Datos Obtenidos Perfil Naca 4412 Inclinación -20 Grados

NACA 4412			
INCLINACION -20 GRADOS			
VELOCIDAD m/s	RPM	VOLTAJE V	CORRIENTE mA
5	69	0.04	0.049
10	110	0.6	0.74

Fuente autores del proyecto

Tabla 9 Datos Obtenidos Perfil Naca 4412 Inclinación -10 Grados

NACA 4412			
INCLINACION -10 GRADOS			
VELOCIDAD m/s	RPM	VOLTAJE V	CORRIENTE mA
5	60	0.02	0.033
10	95	0.53	0.58

Fuente autores del proyecto

Tabla 10 Datos Obtenidos Perfil Naca 4412 Inclinación 0 Grados

NACA 4412			
INCLINACION 0 GRADOS			
VELOCIDAD m/s	RPM	VOLTAJE V	CORRIENTE mA
5	45	0.003	0.004
10	74	0.28	0.35

Fuente autores del proyecto

Tabla 11 Datos Obtenidos Perfil Naca 4412 Inclinación 10 Grados

NACA 4412			
INCLINACION 10 GRADOS			
VELOCIDAD m/s	RPM	VOLTAJE V	CORRIENTE mA
5	29	0	0
10	60	0.06	0.07

Fuente autores del proyecto

Tabla 12 Datos Obtenidos Perfil Naca 4412 Inclinación 20 Grados

NACA 4412			
INCLINACION 20 GRADOS			
VELOCIDAD m/s	RPM	VOLTAJE V	CORRIENTE mA
5	30	0	0
10	50	0.03	0.028

Fuente autores del proyecto

Tabla 13 Datos Obtenidos Perfil Naca 4412 Inclinación 30 Grados

NACA 4412			
INCLINACION 30 GRADOS			
VELOCIDAD m/s	RPM	VOLTAJE V	CORRIENTE mA
5	10	0	0
10	42	0	0

Fuente autores del proyecto

Tabla 14 Datos Obtenidos Perfil Naca 2309 Inclinación -30 Grados

NACA 2309			
INCLINACION -30 GRADOS			
VELOCIDAD m/s	RPM	VOLTAJE V	CORRIENTE mA
5	60	0.09	0.01
10	90	0.1498	0.16

Fuente autores del proyecto

Tabla 15 Datos Obtenidos Perfil Naca 2309 Inclinación -20 Grados

NACA 2309			
INCLINACION -20 GRADOS			
VELOCIDAD m/s	RPM	VOLTAJE V	CORRIENTE mA
5	50	0.008	0.011
10	69	0.0693	0.058

Fuente autores del proyecto

Tabla 16 Datos Obtenidos Perfil Naca 2309 Inclinación -10 Grados

NACA 2309			
INCLINACION -10 GRADOS			
VELOCIDAD m/s	RPM	VOLTAJE V	CORRIENTE mA
5	42	0.002	0.003
10	60	0.018	0.025

Fuente autores del proyecto

Tabla 17 Datos Obtenidos Perfil Naca 2309 Inclinación 0 Grados

NACA 2309			
INCLINACION 0 GRADOS			
VELOCIDAD m/s	RPM	VOLTAJE V	CORRIENTE mA
5	19	0	0
10	35	0.0277	0.026

Fuente autores del proyecto

Tabla 18 Datos Obtenidos Perfil Naca 2309 Inclinación 10 Grados

NACA 2309			
INCLINACION 10 GRADOS			
VELOCIDAD m/s	RPM	VOLTAJE V	CORRIENTE mA
5	29	0	0
10	38	0.001	0.004

Fuente autores del proyecto

Tabla 19 Datos Obtenidos Perfil Naca 2309 Inclinación 20 Grados

NACA 2309			
INCLINACION 20 GRADOS			
VELOCIDAD m/s	RPM	VOLTAJE V	CORRIENTE mA
5	3	0	0
10	10	0	0

Fuente autores del proyecto

Tabla 20 Datos Obtenidos Perfil Naca 2309 Inclinación 30 Grados

NACA 2309			
INCLINACION 30 GRADOS			
VELOCIDAD m/s	RPM	VOLTAJE V	CORRIENTE mA
5	5	0	0
10	15	0	0

Fuente autores del proyecto

Tabla 21 Datos Obtenidos Perfil Naca 6321 Inclinación 0 Grados

NACA 6321			
INCLINACION 0 GRADOS			
VELOCIDAD m/s	RPM	VOLTAJE V	CORRIENTE mA
5	53	0.0028	0.002
10	75	0.0715	0.068

Fuente autores del proyecto

Tabla 22 Datos Obtenidos Perfil Naca 6321 Inclinación 10 Grados

NACA 6321			
INCLINACION 10 GRADOS			
VELOCIDAD m/s	RPM	VOLTAJE V	CORRIENTE mA
5	41	0.0003	0.001
10	57	0.0052	0.003

Fuente autores del proyecto

Tabla 23 Datos Obtenidos Perfil Naca 6321 Inclinación 10 Grados

NACA 6321			
INCLINACION 20 GRADOS			
VELOCIDAD m/s	RPM	VOLTAJE V	CORRIENTE mA
5	36	0	0
10	45	0.0009	0.002

Fuente autores del proyecto

Tabla 24 Datos Obtenidos Perfil Naca 6321 Inclinación -10 Grados

NACA 6321			
INCLINACION -10 GRADOS			
VELOCIDAD m/s	RPM	VOLTAJE V	CORRIENTE mA
5	60	0.0078	0.06
10	86	0.169	0.19

Fuente autores del proyecto

Tabla 25 Datos Obtenidos Perfil Naca 6321 Inclinación -20 Grados

NACA 6321			
INCLINACION -20 GRADOS			
VELOCIDAD m/s	RPM	VOLTAJE V	CORRIENTE mA
5	68	0.058	0.044
10	118	0.45	0.55

Fuente autores del proyecto

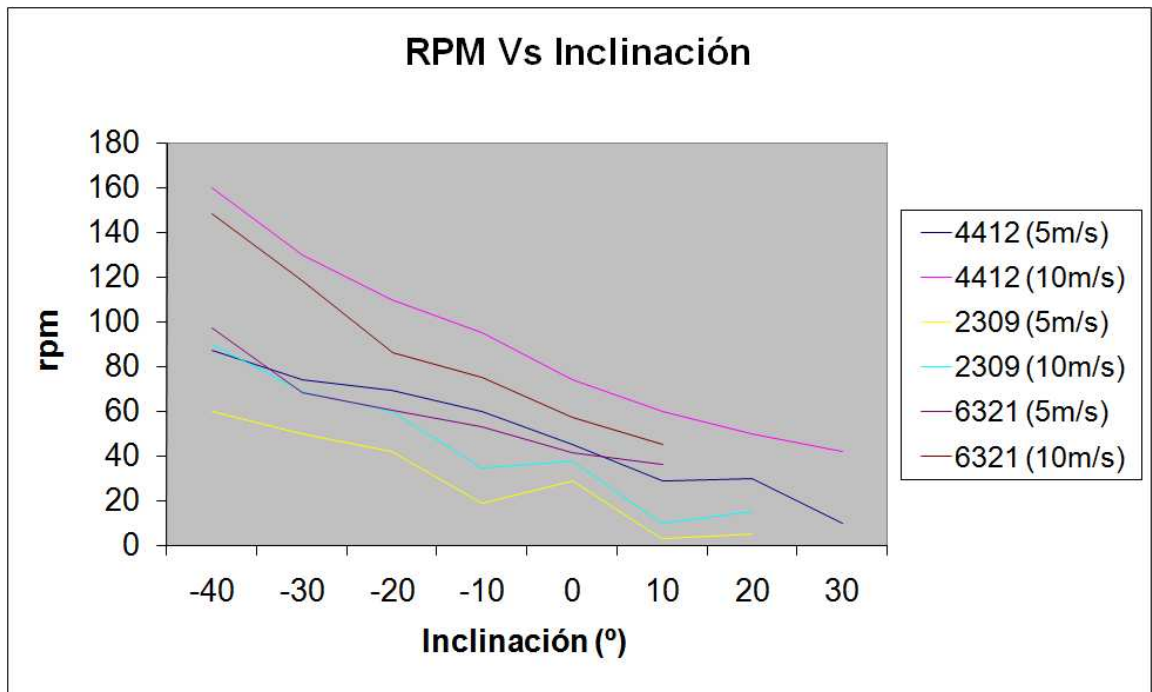
Tabla 26 Datos Obtenidos Perfil Naca 6321 Inclinación -30 Grados

NACA 6321			
INCLINACION -30 GRADOS			
VELOCIDAD m/s	RPM	VOLTAJE V	CORRIENTE mA
5	97	0.213	0.22
10	148	0.95	1.16

Fuente autores del proyecto

Al ser obtenidos los datos, se diseñan las gráficas correspondientes. En la figura 51, se encuentran las RPM Vs Inclinación de cada uno de los perfiles a una determinada velocidad; allí se observa el mayor número de RPM generadas y éstas corresponden al perfil NACA 4412, a una velocidad de 10 m/s. Se demuestra así que el perfil alar más indicado, para la generación de trabajo mecánico, es el NACA 4412.

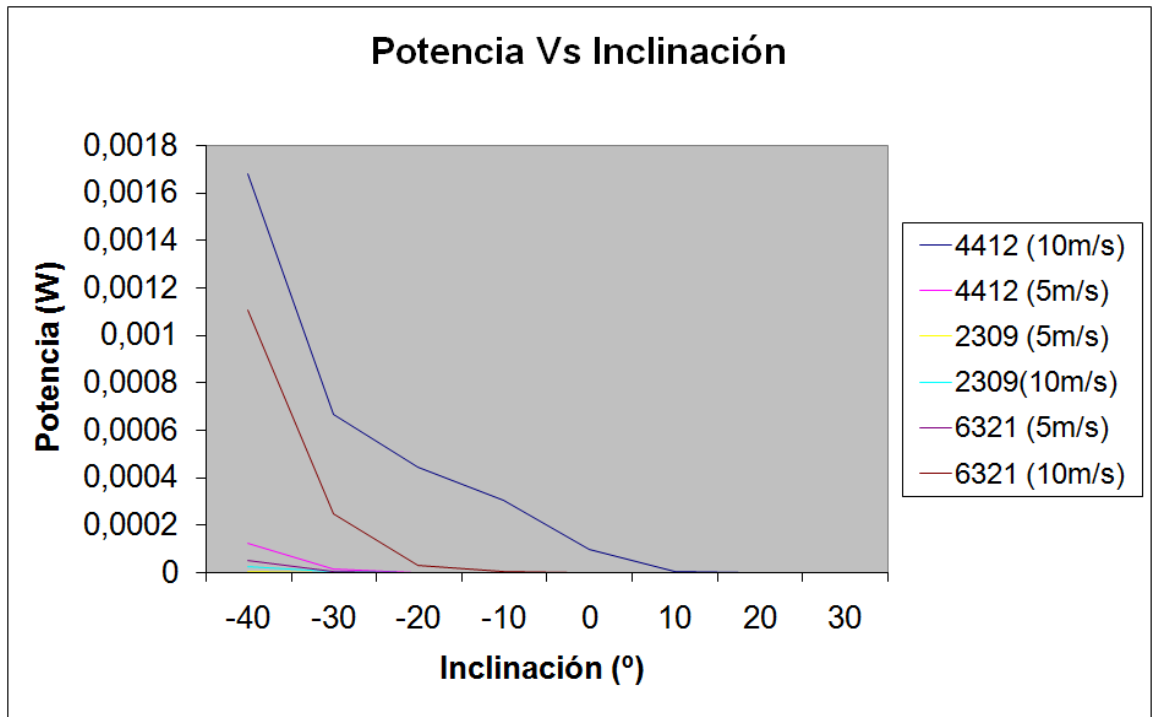
Figura 51 RPM Vs Inclinación



Fuente autores del proyecto

En la figura 52, hay una comparación Potencia Vs Inclinación, donde se muestra que la mayor potencia es ocasionada por el aspa NACA 4412, que concuerda con la cantidad de revoluciones generadas, en comparación de los otros perfiles. Se observa, además, un bajo rendimiento de potencia generada por la máquina eólica; esto se debe a la relación de transmisión 1 a 1 del eje con el generador, puesto que el alternador funciona en un rango de 600 a 700 RPM, que ocasiona así la pérdida de trabajo y, por consiguiente, da bajas potencias.

Figura 52 Potencia Vs Inclinación



Fuente autores del proyecto

Para encontrar la eficiencia del sistema se hace necesario seguir la ecuación:

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Potencia Aerogenerador}}{\text{Potencia Viento}}$$

Según la figura 19 para un TSR igual a 3 se observa un rendimiento del 42%, para un número de palas igual a 3.

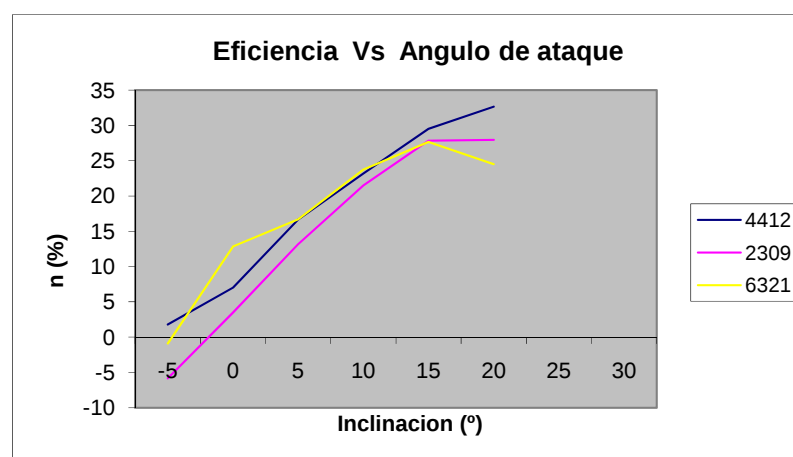
Si la potencia del viento es igual a 88.35 W y según los datos teóricos tenidos en cuenta para el diseño, a un ángulo de inclinación igual a 5 grados, la potencia es de 48.84 W. Por lo tanto se obtiene un rendimiento teórico de 55.28 %.

Adelante se presentan las gráficas de la eficiencia aerodinámica, tanto, teórica como experimental de cada perfil.

La velocidad que se considera para efecto de la realización de las gráficas es de 5 m/s y a continuación se muestra la gráfica de la eficiencia teórica del sistema (Ver figura 53), donde se observa, que la mayor eficiencia se presenta cuando se utiliza el perfil NACA 4412 y un ángulo de inclinación de 25 grados. Por lo contrario, se observa que el perfil menos eficiente es el NACA 6321.

Se deduce de la gráfica, que el ángulo de ataque del perfil influye directamente sobre la eficiencia, ya que de éste depende la cantidad de energía cinética que originara el movimiento del rotor.

Figura 53 Eficiencia Vs Angulo de ataque

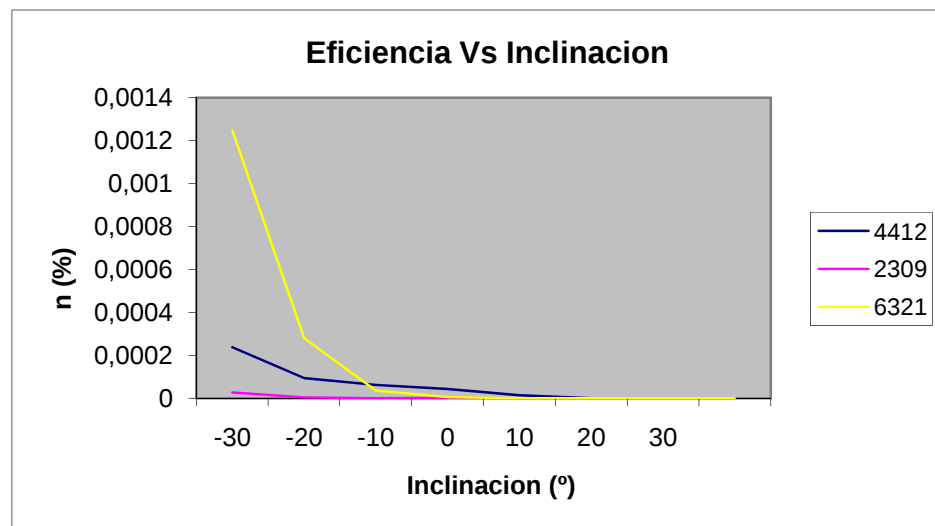


Fuente Autores del Proyecto

En la Figura 54 se muestra la eficiencia experimental, de la cual se deduce, que los resultados de la práctica afirman que el perfil mas eficiente es el NACA 4412, aunque por el contrario, las pruebas de laboratorio arrojan que el NACA 2309 es el perfil con la menor eficiencia de los tres. También se observa de la tabla, que el rendimiento del aerogenerador no fue consecuente con lo mencionado en la teoría, por lo tanto, se puede decir que hay factores que intervienen en la prueba, los cuales perjudican el rendimiento de la máquina eólica.

El más importante de los factores que conllevó a que disminuya la eficiencia, fue el alternador, ya que se utilizó un alternador; cuyo rango de RPM de trabajo es mayor al que proporciona el rotor, por lo tanto, la pérdida de trabajo mecánico, otro factor fue la carga adicional que se debe suministrar al alternador, esto provoca que se requiera mayor fuerza de torque, y por consecuente disminuya las RPM generadas.

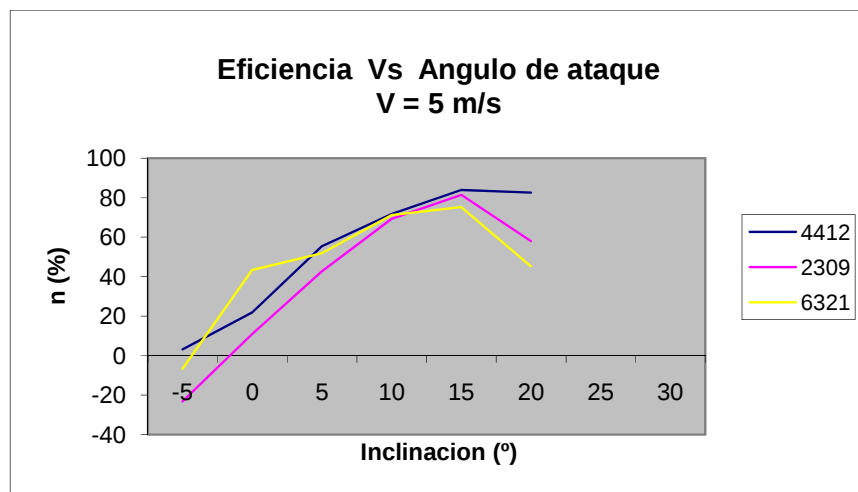
Figura 54 Eficiencia Vs Inclinación



Fuente Autores del Proyecto

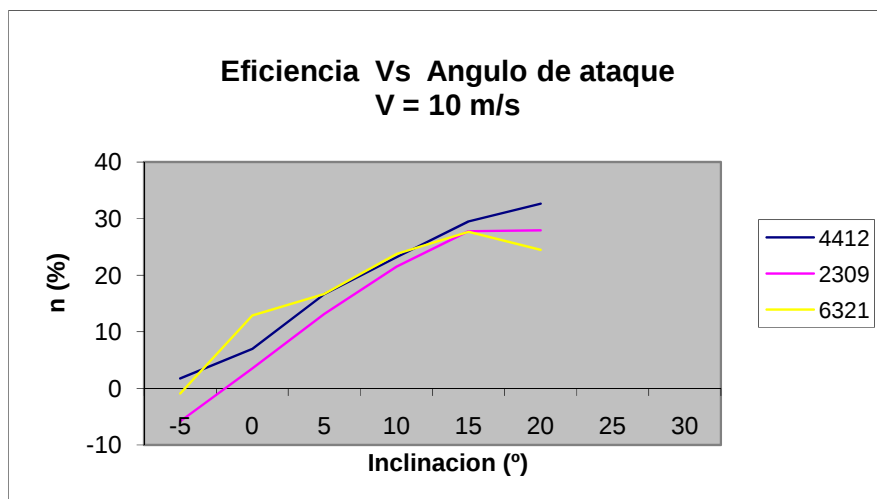
Además, se debe mencionar que la velocidad influye en la variación de la eficiencia, En las figura 55 y 56 se observa el cambio del rendimiento a una velocidad de 5 y 10 m/s respectivamente.

Figura 55 Eficiencia Vs Angulo de ataque



Fuente Autores del Proyecto

Figura 56 Eficiencia Vs Angulo de ataque



Fuente Autores del Proyecto

CONCLUSIONES

- La inclinación del perfil influye directamente en la eficiencia del sistema, ya que la posición determina la cantidad de energía cinética. Ésta, a su vez, es aprovechada por el aspa y transmitida por el rotor, para obtener mayor cantidad de trabajo.
- En los resultados se observa que el ángulo de ataque y la velocidad del viento son factores importantes que influyen en el buen funcionamiento de un aerogenerador.
- En las pruebas, los resultados no fueron los mejores debido a que el área frontal del ventilador utilizado en las pruebas era menor al frontal de las aspas.
- Para elegir el material de construcción del perfil, hay que tener en cuenta que éste sea liviano, resistente y fácil de moldear, para obtener el máximo rendimiento del aspa.
- ANSYS CFX es una herramienta que permite observar el comportamiento del viento, a través del aspa y las fuerzas producidas por la velocidad del viento.
- Los datos recopilados de la simulación ANSYS CFX concuerdan con los resultados obtenidos teóricamente y demuestran que el perfil más adecuado es el NACA 4412.

RECOMENDACIONES

- Debido a que el diseño del rotor tiene las mismas dimensiones que el rotor del generador, es menester acondicionar un variador de velocidad, para lograr que el alternador logre las RPM necesarias y así disminuir las pérdidas en el sistema.
- Como el funcionamiento del alternador Chevrolet necesita una carga de corriente extra para generar su campo magnético, se recomienda agregarle unos imanes permanentes, que no necesitan carga de corriente extra, para generar su campo magnético. Así se evitan pérdidas de energía en el alternador.

BIBLIOGRAFIA

- [1] G.G. Piepers. - EUROPEAN WINDFARM PROJECTS (ISBN 0-08-034315-5) Past Chairman EWEA. Het Vierkant 2, 1852 RA HEILOO, Holanda International Solar Energy Society. Congress (10 th 1987, Hamburgo, Alemania) Editado por W.H Bloss.- Pergamon Press
- [2] HAMROCK, Bernard; SCHMID, Steven, Elementos de Máquinas, Ed 5, Mc Graw Hill, Bogotá -2000.
- [3] M.G. Galludo.- ENERGIA EOLICA (ISBN 84-86505-05-4) Ed Artes Gráficas Gala S.L. Avda República Argentina, 1 (41011) Sevilla
- [4] PERKINS, Courtland, AIRPLANE PERFORMANCEN STABILITY AND CONTROL, Printed in the USA, New York – 1949
- [5] P. F. Díez.- ENERGIA EOLICA Art. Revista Metalurgia y Electricidad 1980
- [6] R. Comolet.- MECANIQUE DES FLUIDES EXPERIMENTALE Masson & Cie 1969.- 120 Boulevard Saint-Germain, París,VI.
- [7] Universidad de los Andes, programa de Magíster en Ingeniería Mecánica (2003): IMEC 428 Aerodinámica. Material de Lectura. Santafé de Bogotá, Colombia.

[8] Wang Cheng Xu.- THE OPERATIONAL STUDY OF A DARRIEUS WIND TURBINE GENERATOR POR APPLICATION DEMONSTRATION (ISBN 0-08-034315-5) Dpto de Ingeniería Eléctrica, Tsinghua Univ. Beijing, China. International Solar Energy Society. Congress (10 th 1987, Hamburgo, Alemania) Editado por W.H Bloss.- Pergamon Press.

[9] INGECIBER. Soluciones ANSYS CFX. [En línea]
<<http://www.ingeciber.com/productos/cfx.php>> [citado en 7 de marzo de 2009]